



**Pedro José de Pinho
Mata**

**Redes de acesso de próxima geração sobre meio
ótico livre**

NGPON over free space optics



**Pedro José de Pinho
Mata**

**Redes de acesso de próxima geração sobre meio
ótico livre**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Mário José Neves de Lima e do Dr. António Luís Jesus Teixeira, ambos do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática e do Instituto de Telecomunicações - Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família e amigos, por me orientarem e auxiliarem em todo este trajeto.

o júri / the jury

Presidente / President

Prof. Doutor José Carlos da Silva Neves

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais / Examiners Committee

Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Professor Associado com Agregação da Universidade de Lisboa

Prof. Doutor Mário José Neves de Lima

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Esta tese marca o culminar do meu percurso académico na Universidade de Aveiro. Durante todos estes anos tive bons e maus momentos, dos quais retiro memórias e aprendizagem. Para este feito é-me imperdoável a não referência de pessoas que estão incontestavelmente, ligadas a esta fase da minha vida.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família e principalmente aos meus pais, que de tudo fizeram para me ajudar, dando apoio e conselhos nos momentos de maior angústia.

Agradeço à Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, ao Instituto de Telecomunicações e a todos os docentes que neles trabalham por me terem recebido e colocado à disposição os meios necessários para o sucesso deste percurso.

Devo também referir a importância neste projeto dos meus orientador e coorientador, Prof. Dr. Mário Lima e Prof. Dr. António Teixeira, que acompanharam o meu trabalho, oferecendo orientação e ajuda nos momentos mais críticos.

Não me posso esquecer do apoio inegável de certas pessoas neste projeto. São elas Ana Maia, Ali Shapari e Bruna Paredes.

Por fim, mas não menos importantes, agradeço aos meus amigos por estarem ao meu lado nos bons e maus momentos e proporcionarem momentos de diversão que jamais esquecerei.

A todos, um muito obrigado.

Palavras-chave

Redes Ópticas Passivas, FSO, TWDM-PON, Cintilação, NG-PON, DP-QPSK

Resumo

Ótica de meio livre, ou FSO como é mais conhecido, aparece como solução para grandes taxas de transferência de dados e maiores larguras de banda necessárias para as redes de comunicações sem fios. Sendo esta uma tecnologia flexível, eficaz e de baixo custo em relação às alternativas existentes no mercado, depressa despertou o interesse das empresas de telecomunicações.

O FSO encontra-se em investigação há bastante tempo. Apesar de ainda existirem desafios que subsistem, o seu relevo leva à possibilidade de ser uma tecnologia complementar. Entre as dificuldades existentes encontram-se problemas de alinhamento entre transmissor e recetor e fenómenos atmosféricos que provocam atenuação e no pior dos casos perda da ligação.

Ao longo desta dissertação, é feito o estudo de diferentes problemas presentes numa ligação FSO e analisado o comportamento de determinados sinais sobre a conexão. Para estes estudos foram aplicados vários sinais tais como NRZ e DP-QPSK e utilizada a tecnologia TWDM numa ligação FSO, analisando o seu desempenho.

Para se analisarem situações onde a realização prática seria muito difícil, foram realizadas simulações, analisando BER, SER, EVM e Perdas do sistema FSO.

Keywords

Passive Optical Networks, FSO, TWDM, Scintillation, NG-PON, DP-QPSK

Abstract

Free space optics or FSO as it is known, appears as a solution for large data rates and higher bandwidth needed for wireless networks. Since this technology is flexible, effective and low cost compared to existing alternatives in the market technology, quickly aroused the interest of telecommunications companies.

The FSO is under investigation for quite some time. While there are still challenges that remain, their relief leads to the possibility of a complementary technology. Among the existing difficulties are problems of alignment between the transmitter and receiver, and atmospheric phenomena that cause attenuation and in the worst case loss of the connection.

Throughout this dissertation, it's done the study of different problems present in FSO connection and analyzes of the behavior of known signals upon the connection. For these studies, different signals like NRZ and DP-QPSK such as TWDM technology are applied and analyzed on a FSO link performance.

To analyze situations where practical testing isn't viable, simulations were used, analyzing BER, SER, EVM and losses of the FSO system

Índice

Lista de Figuras	3
Lista de Tabelas	7
Lista de Acrónimos	9
1 Introdução	11
1.1 Motivação	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Estrutura	12
1.4 Contribuições	13
2 Redes óticas passivas (PON).....	15
2.1 EPON	16
2.2 GPON.....	16
2.3 NG-PON	17
2.4 NG-PON1.....	18
2.5 NG-PON2.....	19
2.6 TWDM-PON.....	19
2.7 Formatos de modulação	22
Não-retorno-zero (NRZ)	22
Modulação de amplitude em quadratura (QAM)	23
Modulação por deslocamento de fase em quadratura (QPSK).....	23
3 Ótica no meio livre	25
3.1 Funcionamento do sistema FSO	27
3.1.1 Sistema básico	27
3.1.2 Elementos do sistema FSO	27
3.1.3 Conceitos básicos	28
Reflexão	29
Refração	30
Lentes.....	32
Espelhos.....	33
3.2 Características atmosféricas para propagação.....	35
3.2.1 Atenuação atmosférica.....	35

	Absorções atmosféricas.....	35
	Dispersão	37
	Atenuação por chuva e neve	39
	Atenuação por neblina e visibilidade	39
3.2.2	Turbulência	40
3.2.3	Atenuação geométrica	43
3.2.4	<i>Thermal Blooming</i>	44
3.2.5	Cintilação	44
3.2.6	Outros fatores que afetam o sistema FSO	46
	Obstruções Físicas	46
	Estrutura.....	46
	Segurança.....	47
4	Simulação e resultados laboratoriais	49
4.1	Resultados de simulação	49
4.1.1	Módulos FSO.....	49
4.1.2	Resultados	52
	Efeitos da Cintilação num sinal NRZ-OOK.....	52
	Efeitos da Cintilação num sinal 16-QAM	56
	Aplicação do DP-QPSK sobre FSO	62
	Aplicação do TWDM sobre FSO	66
4.2	Resultados Laboratoriais.....	70
4.2.1	Equipamento	70
4.2.2	<i>Setup</i> FSO.....	72
4.2.3	Resultados	74
	Perdas no alinhamento	74
	Spot size.....	75
	Perdas ao longo do dia	75
	DP-QPSK sobre FSO	78
	TWDM sobre FSO.....	82
5	Conclusão e Trabalho Futuro	87
5.1	Conclusão.....	87
5.2	Trabalho Futuro	88
Anexo A.	Tunable Multiprotocol XFP Optical Transceiver.....	89
Anexo B.	DSP.....	91
	Bibliografia.....	93

Lista de Figuras

Figura 2.1 : Topologia de uma rede PON [3].....	15
Figura 2.2 : Diferentes arquiteturas da rede GPON [3].....	17
Figura 2.3 : Arquitetura TWDM-PON [6]	20
Figura 2.4 : Comprimentos de onda de trabalho: Reutilização de comprimentos de onda XG-PON [6].....	21
Figura 2.5 : Comprimentos de onda de trabalho: Redefinição da banda C [3]	21
Figura 2.6 : Esquema de modulação NRZ – Diagrama de blocos do transmissor NRZ e as formas de onda de intensidade e fase [7]	22
Figura 2.7 : Diagrama de constelação 16-QAM onde o I representa a fase e Q a quadratura [8]....	23
Figura 2.8 : Diagrama de Constelação para QPSK onde o I representa a fase e Q a quadratura [7]	23
Figura 3.1 : Blocos básicos de um Sistema FSO.....	27
Figura 3.2 : Diagrama de blocos de um Sistema FSO.....	27
Figura 3.3 : Exemplo da reflexão [11]	29
Figura 3.4 : Exemplo de refração [11]	30
Figura 3.5 : Refração para meios de diferentes índices de refração [11]	31
Figura 3.6 : Classificação das lentes quanto à forma [13].....	32
Figura 3.7 : Ponto focal das lentes divergentes [14]	33
Figura 3.8 : Ponto focal das lentes convergentes [14].....	33
Figura 3.9 : Ilustração dos raios incidentes num espelho convexo [15].....	34
Figura 3.10 Ilustração dos raios incidentes num espelho côncavo [15]	34
Figura 3.11 : Exemplo de fatores atmosféricos que afetam o sistema FSO [16]	35
Figura 3.12 : Janelas atmosféricas [17]	36
Figura 3.13 : Representação do feixe ótico em contacto com bolsas de ar [16]	41
Figura 3.14 : C_n^2 vs Tempo [1].....	42
Figura 3.15 : Representação da atenuação geométrica [16]	43
Figura 3.16 : Comportamento do feixe ótico através do espaço livre [16]	45
Figura 4.1 :Módulo VPI - FS_Scintillation	49
Figura 4.2 : Módulo VPI – FSO.....	51
Figura 4.3 : Esquema de simulação da cintilação num sinal NRZ-OOK.....	52
Figura 4.4 : Perdas vs Distância para diferentes C_n^2	53
Figura 4.5 : BER vs Distância para diferentes C_n^2	53

Figura 4.6 : Perdas vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação	54
Figura 4.7 : BER vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação	54
Figura 4.8 : BER vs potência recebida para diferentes C_n^2 e $L=5000$ m.....	55
Figura 4.9 : BER vs potência recebida para diferentes comprimentos de ligação e $C_n^2=5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$	55
Figura 4.10 : Esquema de simulação da cintilação num sinal 16-QAM	56
Figura 4.11 : Perdas vs Distância para diferentes C_n^2	57
Figura 4.12 : SER vs Distância para diferentes C_n^2	57
Figura 4.13 : Perdas vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação.....	58
Figura 4.14 : SER vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação.....	58
Figura 4.15 : SER vs Potência recebida para diferentes C_n^2 e $L=5000$ m.....	59
Figura 4.16 : SER vs Potência recebida para diferentes comprimentos de ligação e $C_n^2=5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$	60
Figura 4.17 : Constelação 16-QAM para diferentes comprimentos de ligação e C_n^2	61
Figura 4.18 : Esquema de simulação de DP-QPSK	62
Figura 4.19 : EVM vs Potência recebida para 10 Gbps	63
Figura 4.20 : EVM vs Potência recebida para 40 Gbps	63
Figura 4.21 : EVM vs Potência recebida para 100 Gbps	64
Figura 4.22 : EVM vs Potência recebida para um comprimento de ligação de 1 km	65
Figura 4.23 : Esquema de simulação de TWDM sobre fibra e FSO	66
Figura 4.24 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm downstream	67
Figura 4.25 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm downstream	68
Figura 4.26 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm upstream	69
Figura 4.27 : BER vs Visibilidade para 1557.3 nm e FSO de 1 km.....	69
Figura 4.28 : Transmissor.....	70
Figura 4.29 : Recetor.....	70
Figura 4.30 : Lente	71
Figura 4.31 : PBS	71
Figura 4.32 : Espelho	71
Figura 4.33 : FSO Setup 1	72
Figura 4.34 : FSO Setup 2.....	72
Figura 4.35 : Esquema real do FSO Setup 2	72
Figura 4.36 : FSO Setup 3.....	73
Figura 4.37 : FSO Setup 4.....	73
Figura 4.38 : Esquema real do FSO Setup 4	73

Figura 4.39 : Spot Size em diferentes pontos do Sistema FSO	75
Figura 4.40 : Perdas de potência ao longo do dia 10 de Abril de 2014.....	76
Figura 4.41 : Perdas de potência ao longo do dia 11 de Abril de 2014.....	76
Figura 4.42 : Perdas ao longo do dia 20 de Maio de 2014	77
Figura 4.43 : DP-QPSK setup 1	78
Figura 4.44 : DP-QPSK setup 2	78
Figura 4.45 : DP-QPSK setup 3	79
Figura 4.46 : EVM vs Potência recebida para 10 Gbps	79
Figura 4.47 : EVM vs Potência recebida para 40 Gbps	80
Figura 4.48 : EVM vs Potência recebida para 100 Gbps	80
Figura 4.49 : Espectro do sinal TWDM	82
Figura 4.50 : TWDM setup 1	83
Figura 4.51 : TWDM setup 2	83
Figura 4.52 : TWDM setup 3	83
Figura 4.53 : BER vs Potência recebida a 1555.3 nm <i>downstream</i>	84
Figura A.1 : Transcetor [25].....	89
Figura A.2 : Diagrama de blocos funcional [25].....	90
Figura B.1 : Principais etapas utilizadas na DSP num recetor digital coerente [26].....	91

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 : Constantes [9].....	37
Tabela 3.2 : Código internacional de visibilidade para as condições do tempo [20]	40
Tabela 4.1 : Parâmetros pré-definidos do FS_Scintillation.....	50
Tabela 4.2 : Parâmetros pré-definidos do FSO	51
Tabela 4.3: Comparação da sensibilidade entre NRZ-OOK e 16-QAM para diferentes comprimentos de ligação	60
Tabela 4.4 : Comparação da sensibilidade entre NRZ-OOK e 16-QAM para diferentes C_n^2	60
Tabela 4.5: Sensibilidade para diferentes <i>bitrates</i> de um sinal DP-QPSK.....	65
Tabela 4.6 : Sensibilidade para diferentes <i>setups</i> de um sinal NRZ (TWDM)	68
Tabela 4.7 : Perdas de potência para diferentes esquemas FSO.....	74
Tabela 4.8 : Comparação entre resultados práticos e de simulação do DP-QPSK.....	81
Tabela 4.9 : Comparação entre resultados práticos e de simulação do TWDM.....	84
Tabela 4.10 : Comparação de resultados entre TWDM e DP-QPSK.....	85

Lista de Acrónimos

BER	Bit Error Rate
CO	Central Office
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FSO	Free Space Optics
DP-QPSK	Double Polarization- Quadrature Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing
EVM	Error Vector Magnitude
FEC	Forward Error Correction
FSAN	Full Service Access Network
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTH	Fiber To The Home
GPON	Gigabit Passive Optical Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Unit
ITU-T	ITU-Telecommunication Standardization Sector
MZI	Mach–Zehnder Interferometer
NF	Noise Figure
NRZ	Non Return To Zero
NT	Network Termination
OA	Optical Amplifier
ODN	Optical Distribution Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OOK	On-Off Keying
PON	Passive Optical Network
PBS	Polarization Beam Splitter
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SMF	Single Mode Fiber
SER	Symbol Error Rate
TDM	Time Division Multiplexing

TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexed
VOA	Variable Optical Attenuator
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplex
WDM-PON	Wavelength Division Multiplex PON
WLAN	Wide Local Area Network
XG-PON	10-Gigabit-capable Passive Optical Network

1 Introdução

1.1 Motivação

O crescente mundo das telecomunicações impõe desafios cada vez maiores. A necessidade das empresas nesta área de encontrar soluções para chegar a um maior número de utilizadores com um menor custo, satisfazendo o crescente apetite destes que esperam novos serviços e aplicações, e a existência do investimento de sucessivos governos nesta área para melhorar a competitividade do país, demonstra o nível de procura de novos tipos de tecnologias.

Atualmente, a melhor solução para as redes de acesso consiste na fibra devido ao seu baixo custo de instalação e manutenção, alta capacidade de transmissão e de suportar vários serviços. Mas a necessidade de uma estrutura física montada para este sistema e a existência de determinadas situações em que a fibra não é a solução mais barata nem a mais cómoda, fez reaparecer uma tecnologia que resolve esses problemas que é o FSO (Ótica de meio livre).

FSO consiste num sistema que envia através do ar um raio de luz visível ou infravermelho. Este necessita de uma linha de visão entre o emissor e o recetor e potência suficiente para o recetor detetar o feixe. A técnica do FSO pode ser utilizada para efetuar ligações de vários quilómetros desde que a visibilidade entre transmissor e recetor o permita.

Ótica do meio livre pode resolver diferentes problemas como restaurar ligações de cabos de fibra partidos e chegar a áreas isoladas em que a instalação de fibra seria impossível ou muito dispendiosa, sendo este um sistema económico e versátil. Também resolve o problema denominado de “Última Milha” que consiste na perda de largura de banda entre a residência e a rede central (últimas centenas de metros).

Os problemas com que o FSO se debate são principalmente atmosféricos, como o nevoeiro, chuva e vento [1]. Devido a este facto é necessário fazer um estudo prévio para implementar este sistema.

1.2 Objetivos

O aumento da exigência por parte dos clientes leva as operadoras a procurarem formas de melhorar os seus serviços além de fornecer novos, sem aumentar o custo. O FSO aparece como solução para estas necessidades.

Posto isto, o principal objetivo deste trabalho é perceber como a secção FSO é afetada pelos diversos problemas atmosféricos, e como isso se reflete em diferentes tipos de sinais que vão estar presentes no NG-PON. Para este estudo são feitas algumas simulações usando o simulador comercial VPI, da Virtual Photonics TM [2] e também algumas medições experimentais.

Para verificar como diferentes sinais são afetados pela ligação FSO, foram realizados vários esquemas experimentais verificando-se EVM (*Error Vector Magnitude*) e BER (*Bit Error Rate*) dos sinais envolvidos.

1.3 Estrutura

Este documento está organizado em quatro capítulos:

- Introdução;
- Redes Óticas Passivas;
- Ótica de meio livre;
- Resultados laboratoriais e de simulação;
- Conclusões e trabalho futuro.

No primeiro capítulo efetua-se o enquadramento e apresenta-se a motivação, objetivos, estrutura e contribuições desta dissertação.

No segundo capítulo são apresentadas as redes óticas passivas que são mais usadas e as características padrão de cada tecnologia são enumeradas. Consiste num capítulo essencialmente descritivo, onde se percebe um pouco da evolução das redes PON. Também é feita uma breve descrição de diversos formatos de modulação.

No terceiro capítulo é feita uma exposição sobre ótica no meio livre. Inicialmente descreve-se de uma forma básica e simples como o sistema funciona e quais os elementos necessários para ter este tipo de sistema. Também é feito um estudo de componente (lentes e espelhos) e suas propriedades, que estão presentes no FSO. Numa

segunda parte são descritos os problemas que afetam este tipo de tecnologia, principalmente os efeitos atmosféricos como o nevoeiro, a chuva, a cintilação, a turbulência, entre outros.

No quarto Capítulo os resultados laboratoriais e de simulação são apresentados.

Na parte da simulação são apresentadas descrições dos módulos que definem o sistema FSO e alguns resultados relativamente ao problema da cintilação para NRZ-OOK e 16-QAM. Depois é feita uma avaliação do sistema para suportar DP-QPSK e TWDM.

Na parte experimental primeiro são dados a conhecer os esquemas que foram utilizados nesta fase, e material relevante. Depois são retirados dados sobre a influência do alinhamento num sistema FSO, retirando também conclusões sobre a importância do *Spot Size*. Posteriormente é feito o estudo do comportamento deste ao longo do dia, cotando temperatura, humidade relativa, precipitação e velocidade do vento. De seguida realiza-se um estudo do NG-PON sobre FSO, empregando DP-QPSK e TWDM.

O quinto capítulo faz uma apreciação do trabalho feito, retirando conclusões da utilização do FSO e referindo tópicos que podem ser estudados nesta área.

1.4 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Observação da influência da distância sobre um sistema FSO;
- Análise do impacto da turbulência no sistema;
- Verificações de como os diferentes fatores climáticos (vento, chuva, temperatura e humidade relativa) afetam as perdas;
- Análise do problema da cintilação para sinais NRZ e 16-QAM;
- Observação do desempenho de um sinal DP-QPSK no sistema FSO;
- Verificação da influência do *bitrate* utilizando DP-QPSK;
- Demonstração do desempenho do TWDM num sistema FSO;
- Análise de como a visibilidade afeta o sistema TWDM;

2 Redes óticas passivas (PON)

As redes óticas passivas são uma das várias tecnologias de acesso utilizadas atualmente.

Como o nome indica, não existem componentes ativos entre o *Central office* (CO) e a residência do cliente, só nestes dois locais.

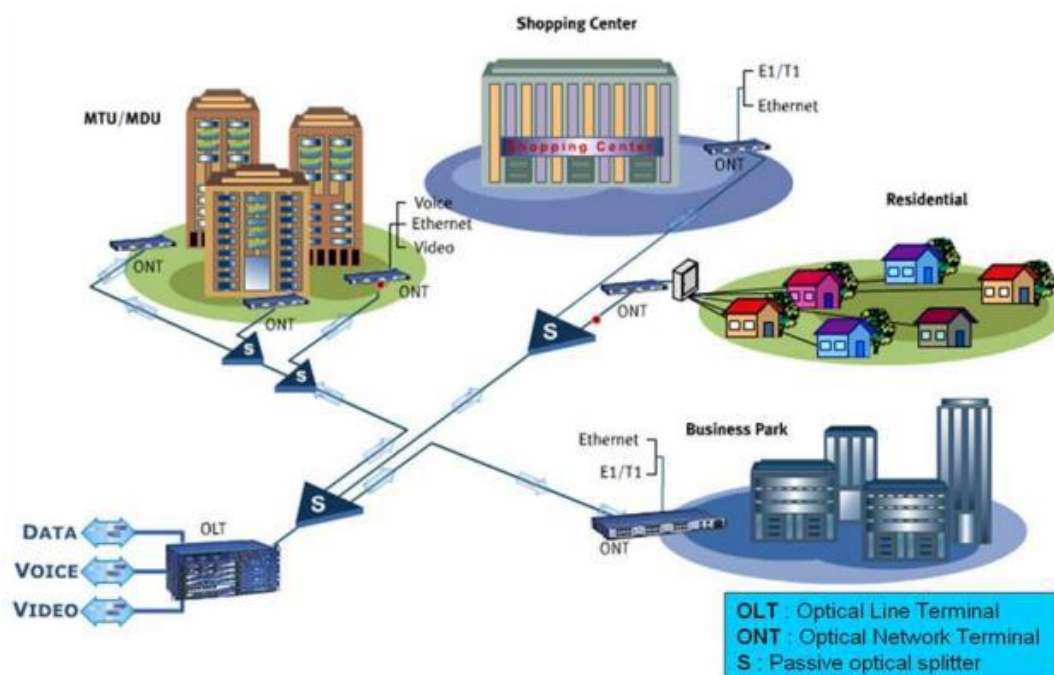


Figura 2.1 : Topologia de uma rede PON [3]

As PON têm como vantagem o facto de os operadores de rede poderem reduzir substancialmente as suas necessidades de fornecimento energético fora do CO, uma vez que não necessitam de instalar nem manter ativos os componentes na rede de acesso. Além disso, as PONs permitem a partilha de uma única interface ótica na OLT entre vários clientes, permitindo por isso minimizar os requisitos de espaço no CO. Possibilitam ainda menores custos operacionais e uma maior fiabilidade. [3]

2.1 EPON

EPON consiste numa rede de acesso do tipo PON, logo os únicos equipamentos ativos são a OLT e as ONUs. Utiliza WDM para a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda, permitindo o fluxo de dados bidirecional na fibra ótica. [3]

O sistema EPON tem as seguintes características técnicas: [3]

- Taxa de transmissão de 1.25 Gbps tanto em *upstream* como *downstream*;
- Alcance físico máximo de 20 km;
- *Split Ratio* 1:16, mas 1:32 se utilizado o FEC;
- Codificação de linha 8b/10b;
- Utilização dos comprimentos de onda 1480 a 1500 nm no *downstream*;
- Utilização dos comprimentos de onda 1260 a 1360 nm no *upstream*;

2.2 GPON

O equipamento ativo de transmissão de uma rede GPON consiste apenas na OLT e nas ONUs.

Além disso, utiliza WDM para a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda, permitindo um fluxo de dados bidirecional através de uma fibra ótica.

Apesar da arquitetura típica GPON ser de fibra até casa do cliente (FTTH), esta pode variar conforme a localização da ONU:

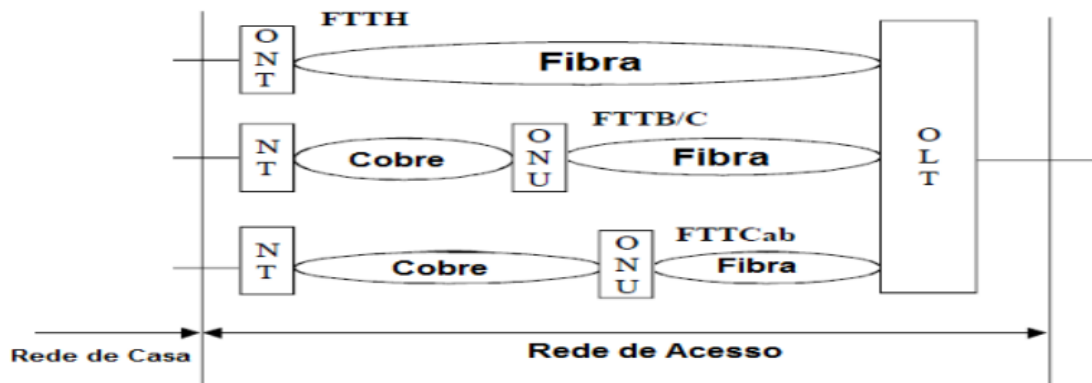


Figura 2.2 : Diferentes arquiteturas da rede GPON [3]

A arquitetura GPON tem as seguintes características: [3]

- Taxas de transmissão *downstream* de 1244.16 e 2488.32 Mbps;
- Taxas de transmissão *upstream* de 155.52, 622.08, 1244.16 e 2488.32 Mbps;
- O código de linha utilizado em ambos os sentidos é o NRZ;
- Alcance físico de 10 e 20 km (assume-se 10 km para taxas de transmissão iguais ou superiores a 1244.16 Mbps);
- *Split Ratio* de 1:64;
- O comprimento de onda de trabalho situa-se entre os 1260 e 1360 nm para *downstream* e *upstream*.

2.3 NG-PON

O G-PON tem atualmente capacidade para as necessidades atuais, mas estas encontram-se num permanente crescimento. Pensa-se que o NG-PON será o desenvolvimento natural da norma G-PON, pois possibilita aos operadores a migração gradual para os sistemas PON da próxima geração.

A evolução da tecnologia NG-PON encontra-se dividida em duas fases: NG-PON1 e NG-PON2.

O NG-PON1, consiste na solução a médio prazo que requer a coexistência da tecnologia XG-PON com GPON no mesmo ODN. Como permite a utilização das infraestruturas já existentes, leva à possibilidade de uma migração mais lenta, apreciado pelos operadores de telecomunicações.

O NG-PON2 consiste numa solução a longo prazo e não requer a coexistência com G-PON no mesmo ODN. Isto demonstra a necessidade de um elevado investimento por parte das operadoras e, ao contrário do NG-PON1 que tem objetivos claros, o NG-PON2 é alvo de uma grande atividade de investigação.

2.4 NG-PON1

Apesar de se prever que os sistemas GPON providenciem capacidade suficiente durante mais alguns anos, o tempo em que as comunicações tenham que migrar para outra solução que forneça maior largura de banda está cada vez mais próximo. O desenvolvimento necessário deve ser conseguido de forma a obter a transição gradual dos sistemas existentes para os novos.

De acordo com o plano de desenvolvimento dos sistemas de próxima geração que foi estabelecido pelo consórcio FSAN, os sistemas da primeira fase (NG-PON1) tem como objetivos principais aumentar a taxa de transferência de informação por utilizador comparando com os sistemas GPON existentes, pelo menos na direção *downstream*, providenciando a coexistência com as redes GPON presentes na mesma ODN, assegurando um desenvolvimento seguro e faseado, permitindo a transição de utilizadores do sistema existente para o novo, quando a necessidade assim o exigir, sem provocar um impacto nos outros utilizadores. [3]

Com o NG-PON1, os novos sistemas XG-PON foram definidos, com uma taxa de transferência de dados de 10 Gbps no sentido *downstream*. [3]

A forma mais simples de adicionar 10G-PON a uma rede já existente com GPON, consiste em usar novos comprimentos de onda para transmitir sinais em ambas as direções. Segundo a recomendação ITU-T G.987, o alcance definido para a transmissão de um sinal 10G-PON será 1260-1280 nm para *upstream* e 1575-1580 nm para *downstream*. No lado da OLT, os dois sistemas devem ser combinados usando um filtro de “coexistência” ótico chamado de WDM1. O requerimento de coexistência deve ser realizado no ODN existente sem alterações. [3]

2.5 NG-PON2

Os requerimentos gerais que se esperam ser cumpridos para o NG-PON2 são: [3]

- 40 Gbps sentido *downstream*;
- 10 Gbps sentido *upstream*;
- *Split ratio* de pelo menos 1:64;
- 20 km de alcance básico da rede;
- Pelo menos 60 km devem ser atingidos com *reach extender* (caso necessário);
- Elevados níveis de segurança e integridade dos dados dos utilizadores;

Foram consideradas várias opções para o NG_PON2. Entre as tecnologias sugeridas estão: [4]

- WDM-PON;
- *Coherent ultra-dense* WDM-PON (UDWDM PON);
- *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) PON;
- 40 Gbit/s TDM PON;
- TWDM-PON (TDM/WDM-PON).

Entre estes, o TWDM-PON foi considerado a melhor solução para o NG-PON2, porque no ponto de vista dos operadores, é considerado o método com menos riscos, menos disruptivo e mais barato do que as outras soluções apresentadas. [5]

2.6 TWDM-PON

O TWDM-PON consiste numa tecnologia que utiliza a multiplexagem do tempo e dos comprimentos de onda a seu favor.

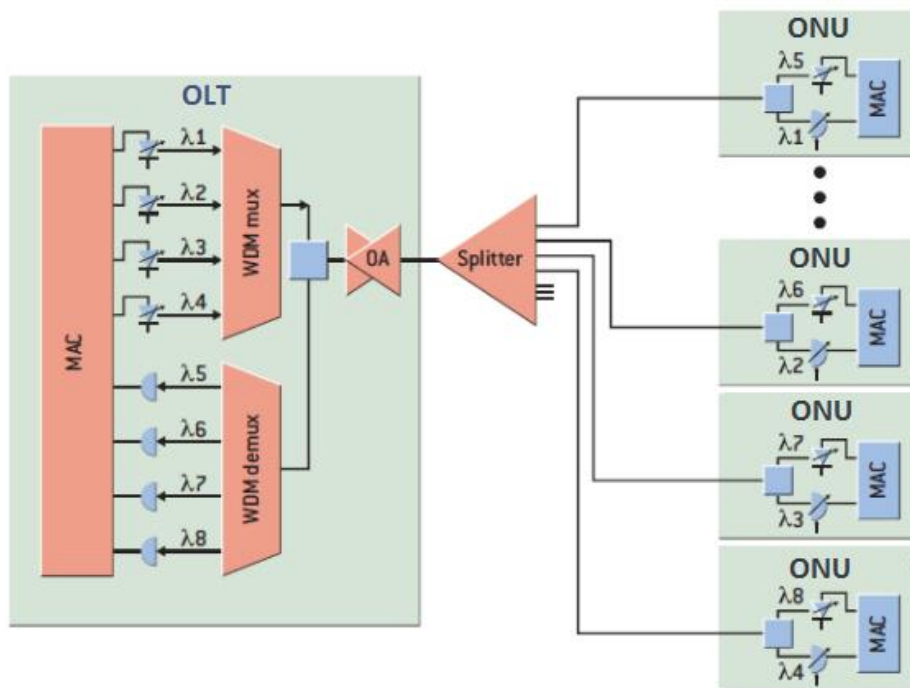


Figura 2.3 : Arquitetura TWDM-PON [6]

Na arquitetura TWDM_PON, quatro XG-PONs são agrupados usando quatro pares de comprimentos de onda diferentes. Para obter um balanço de potência mais elevado, são aplicados amplificadores óticos no lado da OLT. A OLT é capaz de multiplexar e desmultiplexar os diferentes comprimentos de onda. A ONU trabalha com comprimentos de onda de transmissão e recepção distintos e selecionados. A ODN permanece passiva uma vez que tanto o amplificador ótico, como o WDM mux/demux são colocados no lado da OLT. [3]

Um sistema TWDM típico tem as seguintes características: [3]

- *Split Ratio* de 1:64;
- 40 Gbps *Downstream*;
- 10 Gbps *Upstream*;

Apesar do TWDM não apresentar requisitos especiais relativos à gama de comprimentos de onda de trabalho, a necessidade de coexistência com as gerações PON anteriores, leva a ter determinadas precauções. Mas mesmo com estritas restrições, existem várias opções. [3]

A primeira consiste na reutilização das faixas do comprimento de onda XG-PON. Este plano de comprimento de onda é compatível com o GPON, a frequência de rádio 1555nm (RF) e o *Video Overlay*, apesar de bloquear o XG-PON.

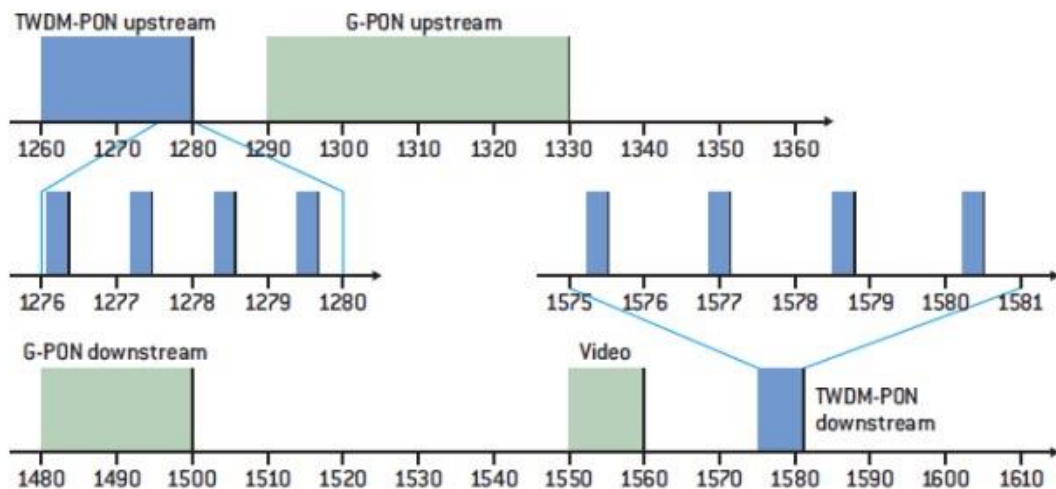


Figura 2.4 : Comprimentos de onda de trabalho: Reutilização de comprimentos de onda XG-PON [6]

Uma segunda opção consiste em redefinir a banda C, para conter os comprimentos de onda *downstream* e *upstream*. Esta alternativa é atrativa porque permite amplificação utilizando EDFAs além de existir compatibilidade com G-PON e XG-PON, sendo um ponto negativo a não coexistência com o Vídeo Overlay. [3]

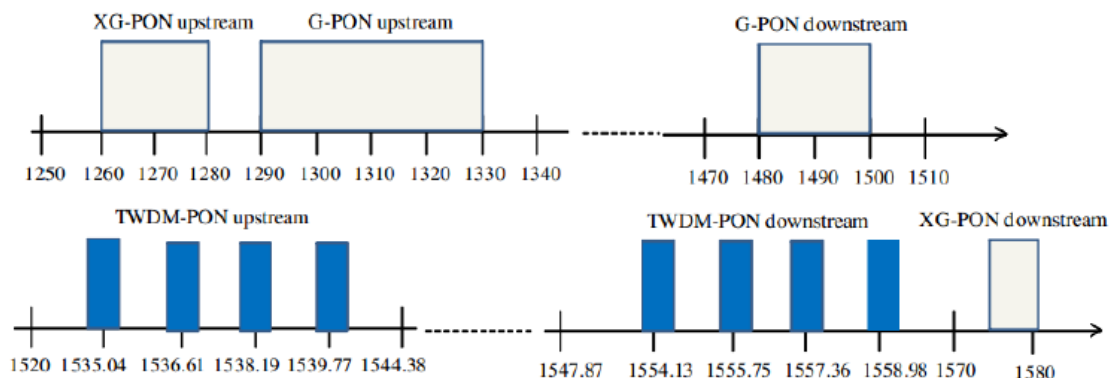


Figura 2.5 : Comprimentos de onda de trabalho: Redefinição da banda C [3]

Outra opção é uma mistura de ambos os planos. Os canais *downstream* seriam projetados na banda *L-plus*, com os canais de *upstream* na banda *C-minus*. Esta opção mantém os canais de vídeo, G-PON e RF, enquanto a transmissão *upstream* é semelhante ao plano de comprimentos de onda para a segunda opção. Este plano de comprimento de onda também é compatível com G-PON e XG-PON, e suporta a coexistência com RF e *vídeo overlay*. A existência das componentes da banda C permite trabalhar com um pré-amplificadores EDFA. [6]

Como se pode verificar, a tecnologia TWDM-PON não tem requisitos especiais relativamente aos comprimentos de onda de trabalho.

2.7 Formatos de modulação

Não-retorno-zero (NRZ)

A forma mais simples de gerar um formato de modulação ótica é recorrendo ao NRZ-OOK, ou simplesmente NRZ. Este formato encontra-se no seu nível lógico durante toda a duração do símbolo. No caso de termos uma sequência de dois ou mais “1’s” seguidos, o sinal não baixa ao nível zero entre eles. Como consequência desta característica, a largura dos impulsos não será sempre igual, variando com a sequência de entrada (mais “1’s” seguidos implica maior largura do impulso). [7]

Este formato tem sido ao longo dos anos a modulação dominante em sistemas de comunicação por fibra ótica. Contudo, considerando os recentes avanços nas comunicações óticas, a modulação NRZ não é a melhor opção para as redes de nova geração, uma vez que o seu desempenho degrada-se drasticamente com o aumento das taxas e comprimentos de transmissão. Apesar disto, continua a ser bastante utilizado devido à sua simplicidade. [7]

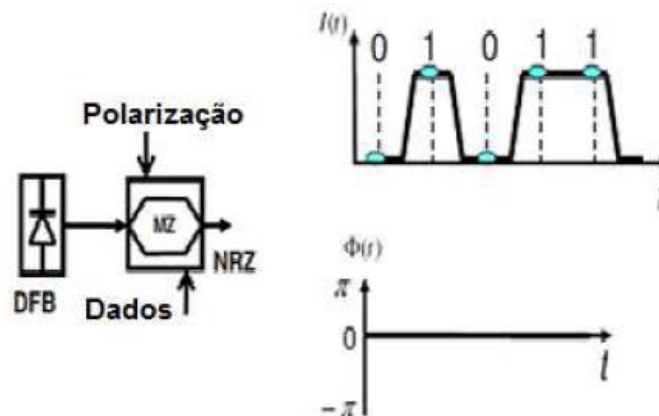


Figura 2.6 : Esquema de modulação NRZ – Diagrama de blocos do transmissor NRZ e as formas de onda de intensidade e fase [7]

Modulação de amplitude em quadratura (QAM)

O QAM é um formato de modulação multinível, em que os símbolos são mapeados num diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica à origem do diagrama que representa a sua amplitude. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da portadora. Por exemplo no 16-QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, estando 4 em cada quadrante, o que significa que cada símbolo representa 4 bits. [7]

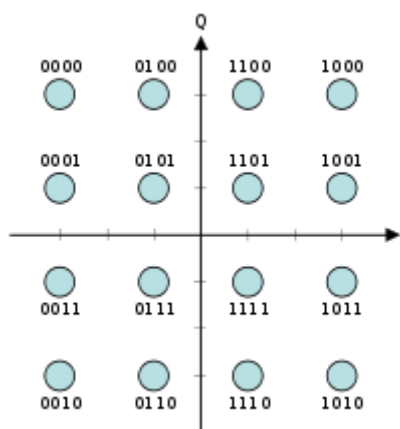


Figura 2.7 : Diagrama de constelação 16-QAM onde o I representa a fase e Q a quadratura [8]

Modulação por deslocamento de fase em quadratura (QPSK)

O formato de modulação QPSK utiliza os quatro pontos no diagrama de constelação, que se encontram equidistantes em torno do círculo. Com as quatro fases, o QPSK pode codificar dois bits por símbolo.

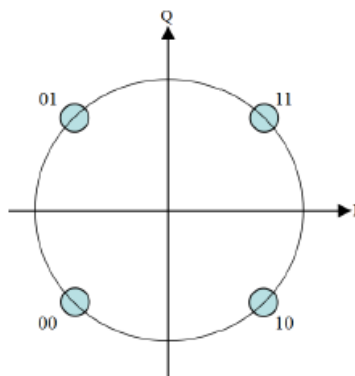


Figura 2.8 : Diagrama de Constelação para QPSK onde o I representa a fase e Q a quadratura [7]

Dentro deste formato encontra-se o DP-QPSK (Dupla polarização QPSK) que consiste na multiplexação de polarização de dois sinais QPSK diferentes, melhorando a eficiência espectral num fator de 2. [7]

3 Ótica no meio livre

O conceito de transmitir informação através do ar recorrendo à modulação de um sinal luminoso já é antigo, mas grandes avanços foram realizados nos últimos 10 anos. A ideia é simples: um feixe estreito de luz é lançado de uma estação de transmissão, transmitido através da atmosfera e consequentemente recebido por um recetor.

Os avanços que levaram ao conceito de ótica em espaço livre, vieram como resposta de necessidade de melhorar os sistemas de comunicação.

Os sistemas FSO apresentam vantagens que levam a um crescente aumento de interesse por esta tecnologia: [9]

- Sistemas FSO e de fibra ótica têm capacidade de largura de banda de transmissão e comprimentos de onda semelhantes;
- Espectro ótico não necessita de licença;
- Utiliza frequências na ordem de centenas de Tera hertz;
- Facilidade de instalação;
- Maior segurança;
- Conexão entre FSO e fibra direta, sem necessidade de conversão (necessita somente de um colimador para direccionar o feixe);
- Sistema flexível;
- Eficiência no custo;
- Aumento de velocidade de transmissão em relação à fibra.

Estas características tornam a tecnologia apetecível para a indústria de comunicações sem fios.

Numa situação em que a ligação física seja inviável, e é necessário uma grande largura de banda, o FSO é a única tecnologia dentro das tecnologias sem fios, que é capaz de garantir vários Gbps de largura de banda, sendo também o menos dispendioso dentro da sua gama. [10]

Todas estas vantagens permitem a utilização do sistema FSO num grande número de situações: [9]

- Acesso a edifícios isolados a comunicações de rede;
- Alta velocidade *LAN-to-LAN*;
- Conexões *chip-to-chip*;
- Conexões temporárias e/ou transitórias de redes de acesso.

A grande desvantagem inerente a esta tecnologia é a sua suscetibilidade a fatores que causam atenuação, e em algumas situações, a perda da conexão. Também é necessária uma linha de visão desobstruída, assegurar um baixo BER ($BER < 10^{-9}$ apesar de ser aceitável $BER < 10^{-6}$) [10] e tem de garantir alta confiabilidade.

Analisando a performance de um sistema FSO, é importante ter em consideração vários parâmetros. De uma forma geral estes parâmetros estão divididos em duas categorias diferentes: [9]

- Parâmetros internos;
- Parâmetros externos;

Os parâmetros internos estão relacionados com o desenho do sistema FSO como: potência de transmissão, comprimento de onda, largura de banda, perdas óticas do lado da emissão e sensibilidade do recetor, etc.

Os parâmetros externos estão relacionados com o ambiente em que o sistema está inserido e inclui, atenuação atmosférica, efeito de cintilação, distância entre emissor e recetor, perdas de janela, entre outros.

Para estudar a disponibilidade de um sistema FSO num local específico, é necessário saber o total de atenuação esperado e a atenuação tolerada pelo sistema FSO para uma determinada distância de ligação.

Os maiores problemas que podem comprometer a disponibilidade da ligação são parâmetros externos: [9]

- Nevoeiro;
- Chuva;
- Absorção;
- Dispersão;
- Obstruções físicas;
- Influência da estrutura;
- Cintilação;

3.1 Funcionamento do sistema FSO

3.1.1 Sistema básico

O sistema FSO oferece uma conexão entre dois pontos, promovendo a troca de informação entre eles. Para isto acontecer, é necessária a assimilação de três partes:



Figura 3.1 : Blocos básicos de um Sistema FSO

O transmissor envia a informação já formatada, através do meio que vai impor limitações e efeitos (atenuações, dispersões, etc.), e o recetor tenta recuperar esta com o máximo de fiabilidade possível. No recetor incluem-se tarefas como deteção, decodificação e correção de erros.

3.1.2 Elementos do sistema FSO

A principal diferença entre o sistema de fibra ótica e o FSO, é o meio de transmissão e os transdutores que devem estar planeados para o meio livre. A figura seguinte demonstra um sistema FSO e suas componentes:

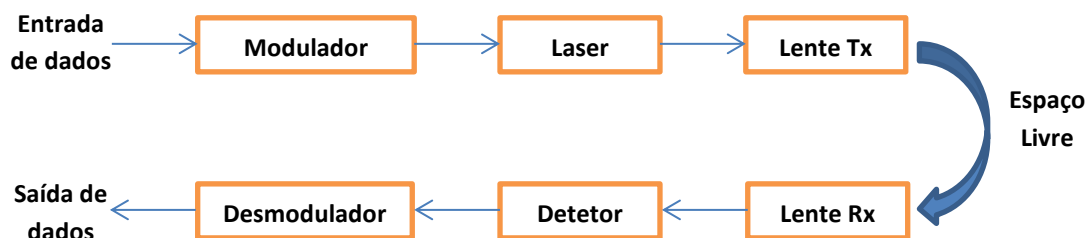


Figura 3.2 : Diagrama de blocos de um Sistema FSO

- **Modulador:** é o responsável pelo formato dos sinais transmitidos, tornando o sinal mais robusto e facilitando a deteção de erros na receção.

- **Laser:** tem a função de emitir um sinal ótico com um determinado comprimento de onda, controlado pelo sinal elétrico da modulação.
- **Lente de transmissão:** torna os raios de luz paralelos, diminuindo a divergência e consequentemente aumentando a concentração de energia, deixando o sistema mais eficiente.
- **Espaço livre:** consiste no meio onde o sinal é transmitido, ocorrendo aqui as maiores perdas que o sistema FSO vai encontrar (atenuação atmosférica, atenuação por espalhamento, turbulência, etc.).
- **Lente de receção:** tem o comportamento contrário à do transmissor, convergindo o feixe de luz para o detetor.
- **Detetor:** recupera o sinal elétrico que provém do feixe ótico modulado incidente.
- **Desmodulador:** O sinal ótico ao ser recebido ainda se encontra em formato analógico, nesta fase converte-se o sinal para digital através de um circuito de decisão e depois verificam-se os erros ocorridos na transmissão.

O sistema de lentes pode ser substituído por um sistema de espelhos com a mesma finalidade. Geralmente, os transmissores e recetores já costumam ter incorporado não só a parte responsável pela transmissão ou receção, mas também um sistema de espelhos ou lentes, retirando a necessidade destes elementos serem exteriores.

3.1.3 Conceitos básicos

Atualmente, os sistemas FSO são desenhados utilizando lentes e espelhos. Estes componentes podem ser utilizados para a transmissão e receção e têm uma grande importância para a performance do sistema.

As lentes são baseadas na propriedade física da refração e as suas propriedades dependem da forma e do material que são feitas.

Os espelhos são assentados na propriedade física da reflexão e dependem da forma e propriedade refletiva dos materiais. [1]

Reflexão

Quando um raio de luz incide numa superfície que não é um absorvedor perfeito, uma parte desta luz é refletida pela superfície como demonstra a figura 3.3:

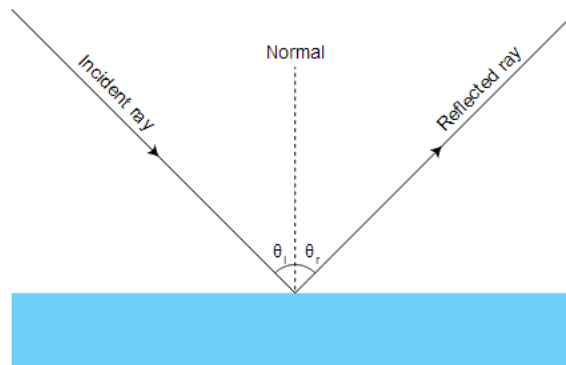


Figura 3.3 : Exemplo da reflexão [11]

Existem dois tipos de reflexões: [12]

- Reflexão especular: se a superfície refletora for polida, os raios refletidos serão paralelos;
- Reflexão difusa: caso a superfície refletora seja áspera, atirando os raios em várias direções;

Considerando um raio de luz que se propaga no ar e incide a um ângulo sobre uma superfície plana e polida como na figura 3.3. Os raios incidentes e refletidos fazem ângulos de θ_i e θ_r , respetivamente, com a linha normal à superfície no ponto onde o raio incidente a atinge. As experiências mostram que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência: [12]

$$\theta_i = \theta_r$$

Equação 1

Por convenção, os ângulos de incidência e de reflexão são medidos a partir da normal à superfície.

Refração

Quando um raio de luz que se propaga através de um meio transparente incide obliquamente sobre uma interface, dirigindo-se para outro meio transparente, parte do raio é refletida, mas parte é transmitida para o segundo meio.

O raio que penetra o segundo meio experimenta uma mudança de direção na fronteira, e diz-se que sofre uma refração.

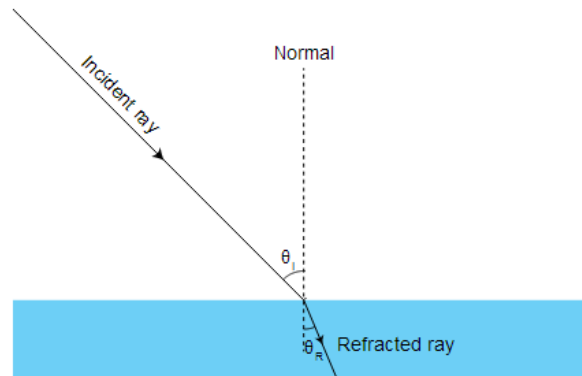


Figura 3.4 : Exemplo de refração [11]

Uma onda luminosa segue em linha reta, exceto se mudar de meio. Cada meio tem o seu próprio índice de refração: [12]

$$n = \frac{\text{Velocidade da luz no vácuo}}{\text{Velocidade média da luz no meio}}$$

Equação 2

Em que n representa o índice de refração do meio.

Como se pode verificar pela equação 2, quando a luz viaja num meio diferente do vácuo a velocidade altera-se, dependendo esta do índice de refração do meio.

Um facto importante de referir é que quando uma onda passa de um meio para outro, a sua frequência não se altera.

O ângulo de refração θ_r , depende das propriedades dos dois meios e do ângulo de incidência.

A relação entre os dois meios é dada pela lei de Snell: [12]

$$\frac{\sin(\Theta_2)}{\sin(\Theta_1)} = \frac{V_1}{V_2} = \text{constante} \quad \text{Equação 3}$$

Em que V_1 é a velocidade da luz no meio 1, V_2 a velocidade da luz no meio 2, Θ_1 o ângulo de incidência e Θ_2 o ângulo de refração.

Na ótica a forma mais comum da lei de Snell é a seguinte: [12]

$$n_1 * \sin(\Theta_1) = n_2 * \sin(\Theta_2) \quad \text{Equação 4}$$

Em que n_1 corresponde ao índice refrativo do meio 1 e n_2 ao índice de refração do meio 2.

Existem duas implicações importantes na lei de Snell: [12]

- O raio transmitido é dobrado em relação à normal quando a luz incidente passa de um material de índice de refração inferior, para um índice de refração mais elevado.
- O raio transmitido é dobrado na direção oposta à normal, quando a luz incidente entra a partir de um material com índice de refração elevado para um material de índice de refração inferior.

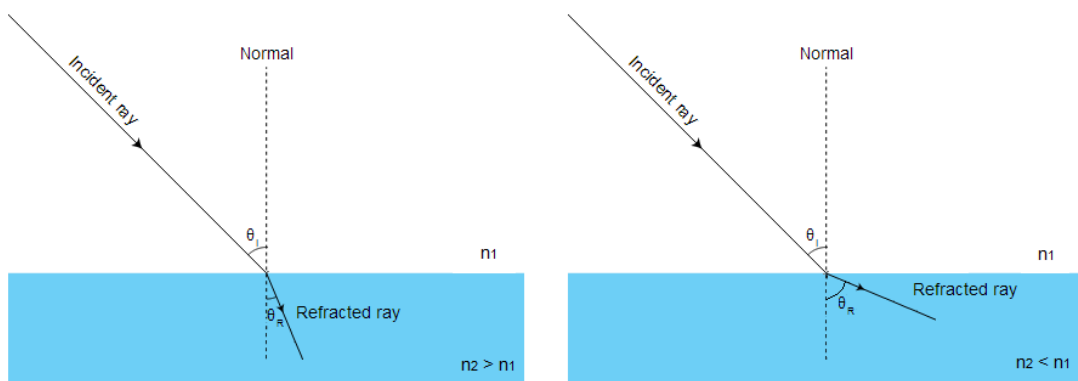


Figura 3.5 : Refração para meios de diferentes índices de refração [11]

Lentes

Uma lente delgada típica consiste num pedaço de vidro ou plástico moldado de tal forma que as suas duas superfícies sejam segmentos de esferas ou planos. Estas lentes são usadas usualmente em instrumentos óticos.

As lentes podem dividir-se em 2 grupos: [1]

- Convergentes (convexas): mais grossas no centro do que na borda.
- Divergentes (concavas): mais finas no centro do que na borda.

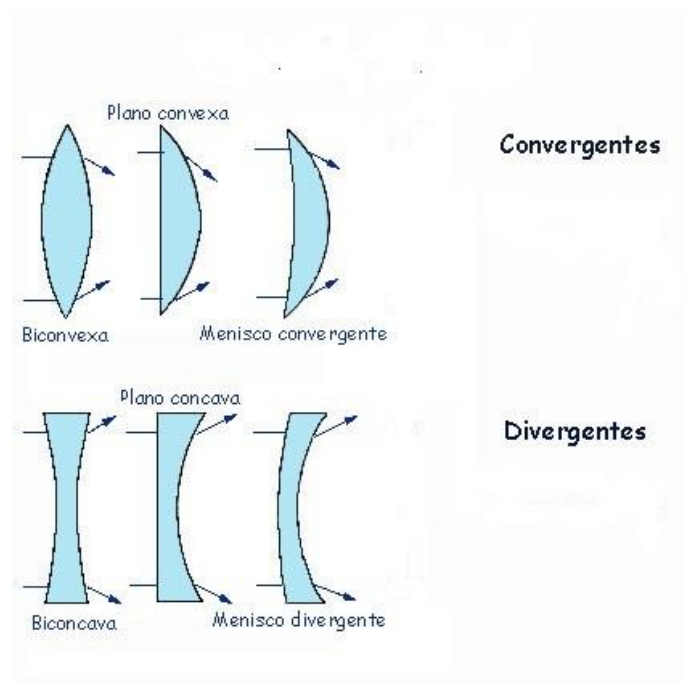


Figura 3.6 : Classificação das lentes quanto à forma [13]

Supondo que um raio de luz passa através do centro de uma lente, aplicando a lei de Snell a ambas as superfícies, descobrimos que o raio é desviado do seu deslocamento original.

As lentes convergentes focam o raio de luz num ponto, chamado o ponto focal, no qual a distância entre este e a lente é denominada distância focal. As lentes divergentes levam o raio de luz para longe do eixo da passagem do feixe.

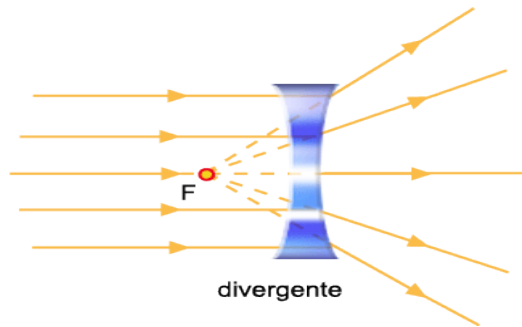


Figura 3.7 : Ponto focal das lentes divergentes [14]

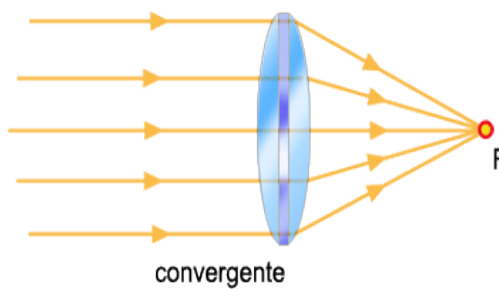


Figura 3.8 : Ponto focal das lentes convergentes [14]

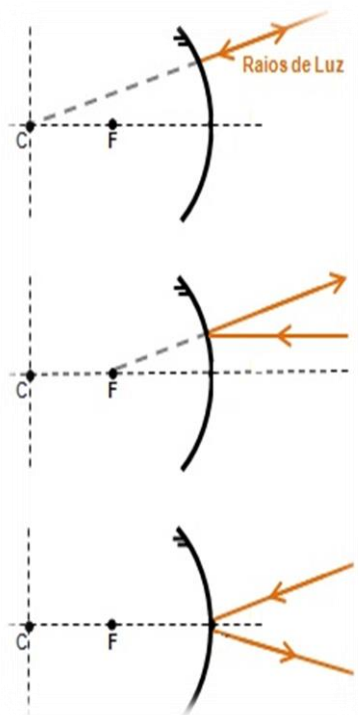
Espelhos

Espelho é uma superfície que reflete um raio luminoso numa direção definida, em vez de absorver ou refratar.

Existem dois tipos de espelhos: [12]

- Espelhos planos
- Espelhos esféricos

Pode-se considerar um espelho plano, qualquer superfície plana que seja capaz de refletir a luz incidente. Um espelho esférico pode subdividir-se em espelho côncavo e espelho convexo. As imagens seguintes demonstram os diferentes tipos de incidência em espelhos circulares em que C é o centro da curvatura, e F o ponto focal, que se encontra a metade da distância entre C e o espelho:

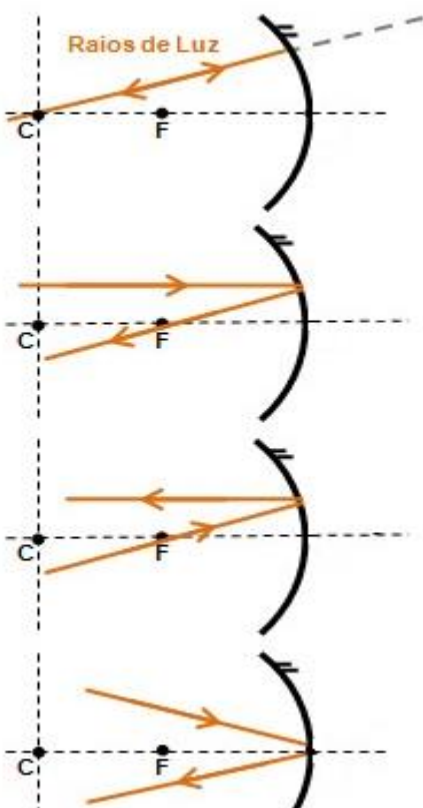


Se o raio incidir na direção do centro de curvatura, este reflete-se sobre si mesmo.

Sendo o raio incidente paralelo ao eixo principal, a versão refletida tem a direção focal. A condição contrária também é válida.

Se o raio incidente acertar no centro da curvatura, ele é refletido de tal forma que o ângulo de incidência e reflexão são iguais em relação ao eixo principal

Figura 3.9 : Ilustração dos raios incidentes num espelho convexo [15]



Se o raio incidente passar pelo centro da curvatura, ele é refletido sobre si mesmo.

Caso o raio de luz incida paralelamente ao eixo principal, este é refletido passando no ponto focal

Todos os raios incidentes que passem pelo ponto focal, são refletidos paralelamente ao eixo principal.

Se o raio incidente acertar no centro da curvatura, ele é refletido de tal forma que o ângulo de incidência e reflexão são iguais em relação ao eixo principal

Figura 3.10 Ilustração dos raios incidentes num espelho côncavo [15]

3.2 Características atmosféricas para propagação

Como era de esperar, o maior entrave aos sistemas FSO são as condições climáticas. Existe uma grande dependência entre estes sistemas e o tempo. Condições como neve, nevoeiro e chuva levam a flutuações de potência no feixe recebido. Este problema leva a que surjam deformações do feixe, efeitos de cintilação e atenuações que reduzem a potência de sinal detetado. [1]

A figura seguinte apresenta alguns dos fatores que afetam o sistema FSO:

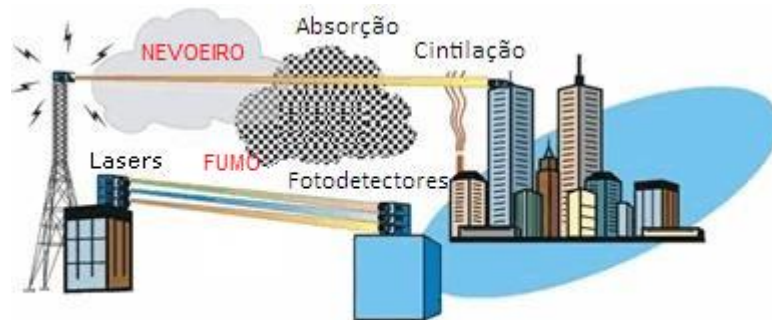


Figura 3.11 : Exemplo de fatores atmosféricos que afetam o sistema FSO [16]

3.2.1 Atenuação atmosférica

A propagação de um feixe ótico na atmosfera leva à existência de interações deste, com diferentes tipos de partículas (gases, poeira em suspensão, gotículas de água, etc). Estas interações levam a uma redução de energia recebida pelo recetor, por isso é de extrema importância o estudo deste fenómeno em sistemas FSO. [17]

Absorções atmosféricas

À medida que a luz se propaga pelo espaço livre, interage com as diversas partículas suspensas, como vapor de água, poeira, e alguns gases, chamando-se a este fenómeno absorção atmosférica.

A atenuação por absorção dependerá das características do sinal, principalmente do comprimento de onda utilizado. Alguns gases causam severas atenuações nos

comprimentos de onda do infravermelho, limitando a transmissão aos comprimentos de onda localizados numa das janelas de alta transmitância:

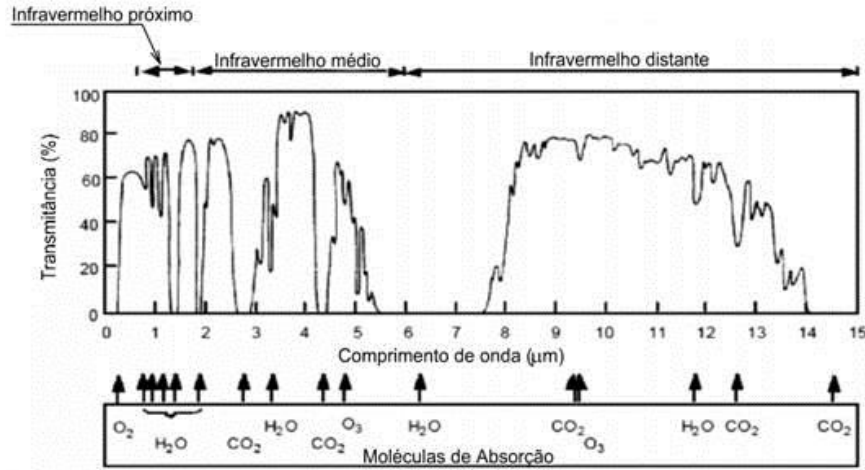


Figura 3.12 : Janelas atmosféricas [17]

As janelas atmosféricas são as faixas do espectro onde o comprimento de onda possui maior transmitância na propagação.

As perdas podem ser descritas em função da transmitância na atmosfera: [10]

$$Losses_{atm} = 10 \log \tau \left[\frac{dB}{Km} \right] \quad \text{Equação 5}$$

A equação seguinte descreve a transmitância ótica: [9]

$$\tau = \tau_a + \tau_s = \frac{P(l)}{P(0)} = \exp(-\alpha l) \quad \text{Equação 6}$$

Onde α é o coeficiente de atenuação, τ_a a transmitância por absorção, τ_s a transmitância por espalhamento e l a distância.

A partir da equação 6 pode-se retirar que a potência decai exponencialmente com a distância.

A transmitância por absorção é obtida pela expressão seguinte: [9]

$$\tau_a = \exp\left(-A_i w^{\frac{1}{2}}\right), \quad w < w_i$$

$$\tau_a = k_i \left(\frac{w_i}{w}\right)^{\beta_i}, \quad w > w_i$$

Equação 7

Onde A_i , k_i , β_i e w_i são constantes presentes na tabela subsequente:

Limites da janela (nm)	A_i	k_i	β_i	w_i
720 – 940	0.0305	0.800	0.112	54
940 – 1130	0.0363	0.765	0.134	54
1130 – 1380	0.1303	0.830	0.093	2
1380 – 1900	0.211	0.802	0.111	1.1
1900 – 2700	0.350	0.814	0.1035	0.35
2700 – 4300	0.373	0.827	0.095	0.26
4300 – 6000	0.598	0.784	0.122	0.165

Tabela 3.1 : Constantes [9]

O w é o índice de água precipitável, encontrado no feixe de luz, em milímetros, e dado por: [9]

$$w = 10^{-3} \rho l$$

Equação 8

Em que ρ é a humidade absoluta, em g/m^3 : [9]

$$\rho = RH \left(-0.74 + 90.96 \exp\left(\frac{T}{13.67}\right) - 85.4 \exp\left(\frac{T}{13.52}\right) \right)$$

Equação 9

Onde RH é a percentagem de humidade relativa e T , a temperatura em graus Celcius.

Dispersão

Outro fator que causa atenuação é a dispersão. A dispersão ocorre quando o feixe de luz transmitido encontra partículas distribuídas no meio de transmissão. Estas partículas redirecionam parte da energia do feixe e reduzem a quantidade de potência captada pelo recetor. [17]

Existem principalmente três tipos de dispersão: [18]

- Dispersão de Rayleigh – é causada pelas moléculas com diâmetro inferior a aproximadamente $\frac{1}{10} \lambda$ e é inversamente proporcional a λ^4 .
- Dispersão de Mie – ocorre quando o comprimento de onda for comparável que o raio da partícula. Esta dispersão é causada sobretudo por aerossóis.
- Dispersão Não-Seletiva – ocorre quando o comprimento de onda for menor que o raio da partícula.

A transmitância por dispersão é dada por: [9]

$$\tau_s = \exp(-l(C_1 \lambda^{-\delta} + C_2 \lambda^{-4})) \quad \text{Equação 10}$$

C_1 , δ e C_2 , são constantes dadas pela distribuição de massa, concentração de aerossol, e espalhamento de Rayleigh e λ é o comprimento de onda em μm .

$$C_2 = 0.00258 \text{ m}^3$$

C_1 é dado por: [9]

$$C_1 = \frac{3.91}{V} (0.55)^\delta \quad \text{Equação 11}$$

Em que V representa o alcance visual em km utilizando 550 nm

Os valores de δ dependem de V e do modelo utilizado: [19]

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases} \quad \text{Equação 12}$$

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.585^{1/3} & V < 6 \end{cases} \quad \text{Equação 13}$$

As equações 12 e 13 correspondem ao *Kim model* e *Kruse model* respetivamente.

Se estivermos na presença de precipitação (chuva ou nevoeiro), o coeficiente de espalhamento vai aumentar, obtendo assim a seguinte equação: [9]

$$\tau_{rain} = \exp(-(0.05556 + 0.00848 R - 3.66 * 10^{-5} R^2)l) \quad \text{Equação 14}$$

Onde R é a taxa de precipitação, em mm/h.

Então a transmitância total é dada por: [9]

$$\tau = \tau_a + \tau_s + \tau_{rain} \quad \text{Equação 15}$$

Atenuação por chuva e neve

A chuva tem um impacto muito menor que o nevoeiro em questões de atenuação, provocando assim uma atenuação moderada. Para contornar esta atenuação deve-se projetar o sistema tendo em conta uma margem para precaver a existência deste fator.

A atenuação provocada pela chuva depende do fator R (taxa de chuva). Para climas da Europa central, normalmente $R = 5$ mm/h, em que a atenuação é aproximadamente 3 dB/km. [1]

Deve-se ter em conta que existem fenómenos climáticos raros em que $R = 100$ mm/h, sendo a atenuação de aproximadamente 30 dB/km. [1]

Em relação à neve, a queda de mais de 5 cm em 3 horas pode levar a atenuações acima dos 45 dB/km. [1]

Atenuação por neblina e visibilidade

A neblina é um dos fatores mais debilitantes do sinal num sistema FSO. Esta é constituída por gotículas de água de diâmetro muito pequeno (na ordem dos micro), que formam um obstáculo na trajetória do laser, atenuando-o, podendo mesmo suspender a transmissão do sistema FSO quando este é muito denso, não permitindo a receção do sinal. Este problema pode ser contornado, utilizando sistemas FSO de curta distância interligados.

Os diferentes graus de neblina e sua respetiva atenuação e visibilidade são dados pela seguinte tabela:

Condições do tempo	Visibilidade (m)	Atenuação (dB/km)
Nevoeiro denso	0-50	-271.65
Nevoeiro grosso	200	-59.57
Nevoeiro moderado	500	-20.99
Nevoeiro leve	770-1000	-9.26 até -12.65
Nevoeiro fino	1900-2000	-3.96 até -4.22
Neblina	2800-4000	-1.62 até -2.58
Neblina fina	5800-10000	-0.44 até -0.96
Limpo	18100-20000	-0.22 até -0.24
Muito limpo	23000-50000	-0.06 até -0.19

Tabela 3.2 : Código internacional de visibilidade para as condições do tempo [20]

3.2.2 Turbulência

Analisando os problemas referenciados anteriormente, pode-se concluir que em locais com clima quente e seco o sistema FSO tem um desempenho favorecido. Mas esta constatação não é uma verdade absoluta, porque nestas regiões ocorrem fenômenos designados por turbulências. O aquecimento do solo e posteriormente, o aquecimento das bolsas de ar levam à presença deste fenômeno.

Algumas bolsas de ar são aquecidas mais do que as outras provocando variações constantes do índice de refração, modificando assim a direção do feixe ótico e consequentemente interferindo na propagação. A figura seguinte demonstra a passagem de um feixe ótico por bolsas de ar:

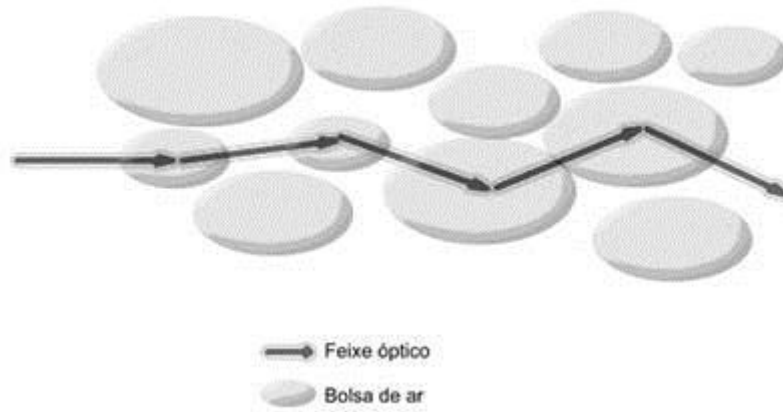


Figura 3.13 : Representação do feixe óptico em contacto com bolsas de ar [16]

A turbulência afeta a amplitude e a fase de um sinal ótico.

Para medir a força da turbulência, é utilizado o parâmetro C_n^2 (Coeficiente de estrutura atmosférica), esta constante pode ser determinada experimentalmente por: [16]

$$C_n^2(z) = \frac{\langle (T(x, z) - T(x + r, z))^2 \rangle}{r^{2/3}} \left[80 \times 10^{-6} \frac{P(z)}{(T(z))^2} \right]^2 \quad \text{Equação 16}$$

Em que $P(z)$ é a pressão do ar em milibars, $T(x, z)$ é a temperatura em graus Kelvin na posição x e altura z , $T(x + r, z)$ é a temperatura em graus Kelvin na posição $x+r$ e altura z , e r o comprimento da ligação em km.

Analisando a equação 16, pode-se verificar que o fator C_n^2 depende de diversos fatores atmosféricos que variam ao longo do dia, como pressão atmosférica e temperatura.

Normalmente C_n^2 tem ordens de grandeza de 10^{-12} a 10^{-16} [21] representando respetivamente turbulência forte e turbulência fraca. Estes valores têm o seu ponto alto ao meio do dia quando as temperaturas são mais elevadas, verificando-se mais eventos de cintilação neste ponto do dia.

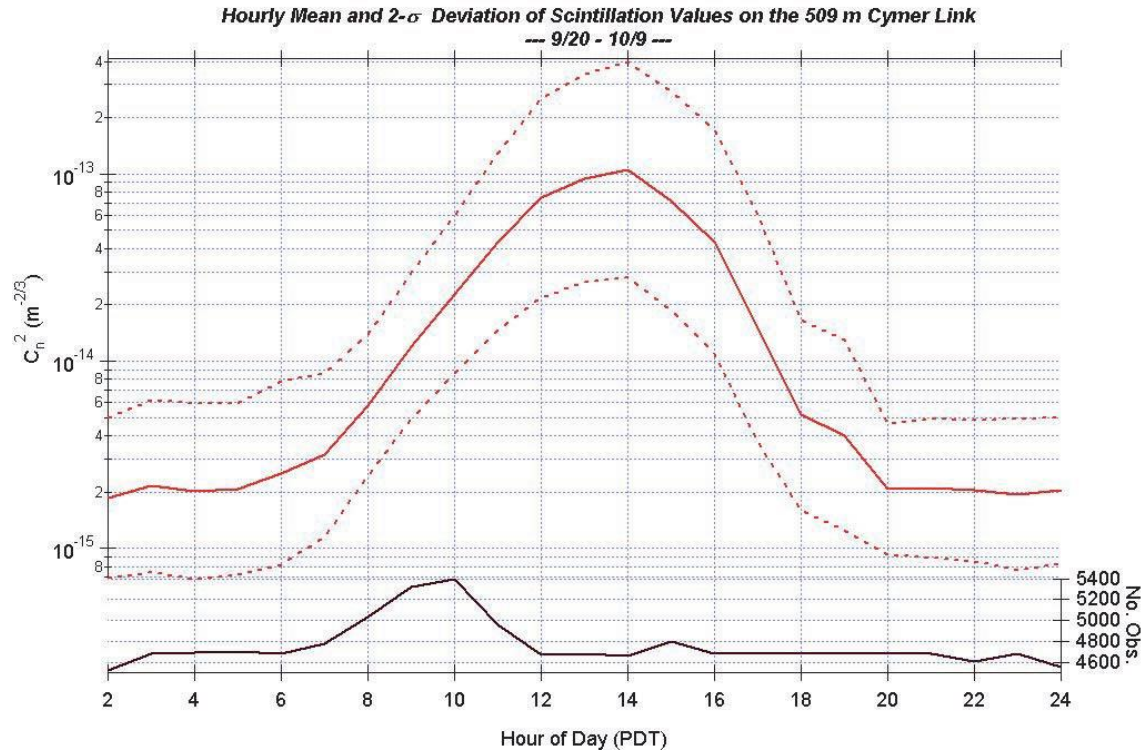


Figura 3.14 : C_n^2 vs Tempo [1]

A figura 3.14 mostra a evolução do C_n^2 ao longo de um dia em San Diego, Califórnia, Estados Unidos da América.

A turbulência pode levar a três fenómenos diferentes: [20]

- **Passeio do feixe:** Na presença de grandes bolsas de ar (maiores que o diâmetro do feixe), o alinhamento do feixe ótico é modificado através da mudança do índice de refração. Utilizando um bom sistema de auto alinhamento podemos reduzir a influência desta ocorrência.
- **Aumento da divergência do feixe:** consiste no aumento da seção transversal do feixe, mais do que previsto na análise da atenuação por divergência.
- **Cintilação (mudanças de fase):** O efeito devido às mudanças de fase sofridas por partes do feixe que percorrem comprimentos óticos ligeiramente diferentes, devido à propagação através de bolhas de ar quentes menores que o diâmetro do feixe. Essas partes do feixe, ao alcançarem o recetor geram interferências construtivas e destrutivas. Isso causa flutuações na intensidade do sinal recebido em torno de um valor médio.

A variância radial do “passeio do feixe” pode ser descrita por: [1]

$$\sigma_r^2 = 1.90 C_n^2 (2w)^{-1/3} l^3$$

Equação 17

Onde w é a dimensão do ponto do transmissor.

Também é possível determinar a variância de Rytov que representa a variância das flutuações da irradiação: [1]

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad \text{Equação 18}$$

Este fator é determinado em W/m^2 , onde $k = 2\pi/\lambda$ e L é o comprimento da ligação em m.

3.2.3 Atenuação geométrica

Existe a impossibilidade de um feixe ótico estar completamente alinhado, porque a luz sofrerá um espalhamento, provocando perdas.

Ao projetar um sistema FSO, o cálculo dessa atenuação é calculado a partir do ângulo de divergência que o laser provoca. Esta divergência faz com que a área do feixe ótico ao longo do percurso aumente, levando a que apenas uma parte da energia transmitida seja captada pelo recetor.

A figura seguinte demonstra este evento:

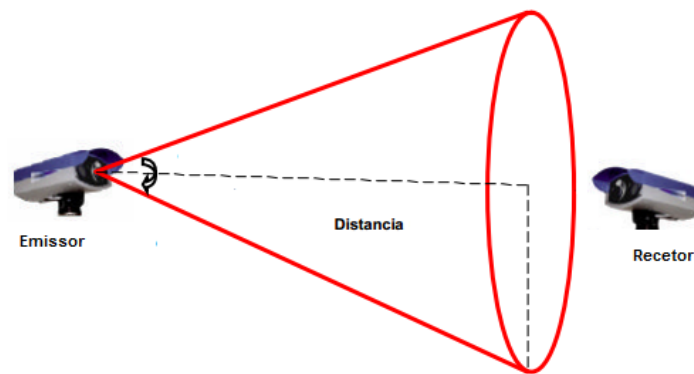


Figura 3.15 : Representação da atenuação geométrica [16]

A transmitância geométrica do feixe é dada pela seguinte equação: [20]

$$\tau_{GEO} = \frac{d_{Rx}^2}{(d_{Tx} + \theta L)^2} \quad \text{Equação 19}$$

Em que o d_{Rx} é o diâmetro do recetor em metros, d_{Tx} o diâmetro do transmissor em metros, θ o ângulo de divergência do feixe e l o comprimento do feixe em km.

O ângulo de divergência pode ser calculado através da seguinte aproximação: [22]

$$\Theta * l = D \quad \text{Equação 20}$$

Em que o Θ consiste no ângulo de divergência em miliradianos, l a distância do emissor ao *spot size* em km e D o diâmetro do *spot size* em metros.

3.2.4 Thermal Blooming

A absorção molecular de energia do feixe pelo ar, vai induzir a um gradiente de temperatura, levando a mudanças de densidade e índice de refração. A presença de fluxo de ar (vento), leva à deformação do feixe na direção do fluxo do ar.

Este deslocamento é dado pela seguinte fórmula: [9]

$$u = \frac{5.(\gamma - 1).(n - 1).l.\left(\frac{\langle I_0 \rangle}{w}\right)^2}{6.\gamma.P.100.|v.\sin(\theta)|} \quad \text{Equação 21}$$

Onde γ consiste numa proporção de calor específico (1.4 no ar), n é o índice de refração do ar, I_0 a potência do feixe no emissor, P a pressão atmosférica, v a velocidade do vento, θ o ângulo entre a direção do vento e o feixe, l o comprimento da ligação e w o *spot size* no transmissor.

3.2.5 Cintilação

Este fenómeno consiste na variação temporal e espacial da intensidade da luz provocado pela turbulência atmosférica. Esta consequência ocorre devido à propagação do feixe ótico através de bolhas de ar quentes menores que o diâmetro do feixe. Trata-se do efeito que traz maiores prejuízos num sistema FSO.

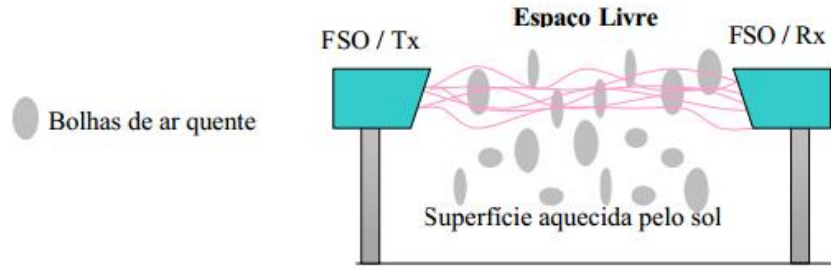


Figura 3.16 : Comportamento do feixe óptico através do espaço livre [16]

Apesar da cintilação ser um processo atmosférico muito conhecido, ainda não foi definido com exatidão. Apesar deste facto existem equações que podem fornecer valores com margens de erro razoáveis.

O índice de cintilação pode ser dado por: [23]

$$\sigma_I^2 \cong \exp(\sigma_{Inx}^2 + \sigma_{Iny}^2) - 1 \quad \text{Equação 22}$$

Onde: [23]

$$\sigma_{Inx}^2 = \frac{0.49 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1} \right)^2 \sigma_B^2}{\left\{ 1 + \frac{0.4(1 + \Theta_1)(\sigma_B/\sigma_R)^{12/7}}{(\Omega_G + \Lambda_1) \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}(1 - \Theta_1) + \frac{1}{5}(1 - \Theta_1)^2 \right)^{6/7}} + 0.56(1 + \Theta_1)\sigma_B^{12/5} \right\}^{7/6}} \quad \text{Equação 23}$$

e

$$\sigma_{Iny}^2 = \frac{0.51 \sigma_B^2 (\Omega_G + \Lambda_1) (1 + 0.69 \sigma_B^{12/5})^{-5/6}}{\Omega_G + \Lambda_1 + 1.2 (\sigma_B/\sigma_R)^{12/5} + 0.83 \sigma_R^{12/5}} \quad \text{Equação 24}$$

com: [23]

$$\begin{aligned} \Theta_0 &= 1 \\ \Lambda_0 &= 2 \frac{2L}{k W_0} \\ \Theta_1 &= \frac{\Theta_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} \\ \Lambda_1 &= \frac{\Lambda_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} \end{aligned}$$

$$\Omega_G = \frac{16 L}{k D_G^2}$$

$$\sigma_B^2 \cong 3.86 \sigma_R^2 \left\{ 0.40 [(1 + 2\theta_1)^2 + 2\Lambda_1^2]^{5/12} \cos \left[\frac{5}{6} \tan^{-1} \left(\frac{1 + 2\theta_1}{2\Lambda_1} \right) \right] - \frac{11}{16} \Lambda_1^{5/6} \right\} \quad \text{Equação 25}$$

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad \text{Equação 26}$$

L é o comprimento da ligação em m, $k = 2\pi/\lambda$, W_0 é o raio da cintura do feixe à saída do emissor e D_G a abertura do recetor.

Para obter a atenuação devido à cintilação, em dB: [23]

$$\alpha \cong 10 \log(1 + 1.63 \sigma_R^{\frac{12}{5}} \Lambda_1) \quad \text{Equação 27}$$

3.2.6 Outros fatores que afetam o sistema FSO

Obstruções Físicas

As obstruções físicas levam a problemas na receção, podendo mesmo levar à interrupção da ligação.

Um simples pássaro ao passar sobre o feixe, pode retirar a linha de visão do emissor sobre o recetor, levando à interrupção do sistema, mesmo momentaneamente.

Estrutura

O emissor deve estar bem alinhado com o recetor, não devendo estes, ter uma localização onde estejam suscetíveis a vibrações. Locais de atividade sísmica, também são suscetíveis à perda de alinhamento do emissor/recetor.

Para contornar este problema, o sistema FSO deve ter um bom sistema de auto alinhamento com múltiplos feixes óticos.

Segurança

O sistema FSO usa lasers de grande potência na transmissão (> 6 dBm), e a exposição humana a estes raios pode causar lesões oculares, assim, é necessário a implementação de padrões internacionais que ajustem a segurança com o desempenho do sistema.

4 Simulação e resultados laboratoriais

4.1 Resultados de simulação

A simulação permite fazer observações, onde na prática seriam de difícil realização devido a diferentes fatores como tempo e material. Nesta secção também são feitos testes que contribuem para a validação dos resultados experimentais.

4.1.1 Módulos FSO

Para simular o esquema FSO, foi utilizado um simulador comercial de seu nome VPI da Virtual Photonics TM [2]. Os módulos usados são o FS_Scintillation e o FSO. Estes módulos assumem que o feixe gaussiano do transmissor é colimado e usam o modelo espectral Kolmogorov. [23]

FS_Scintillation é um módulo que calcula o índice de cintilação, atenuação e flutuações provocadas pela cintilação.

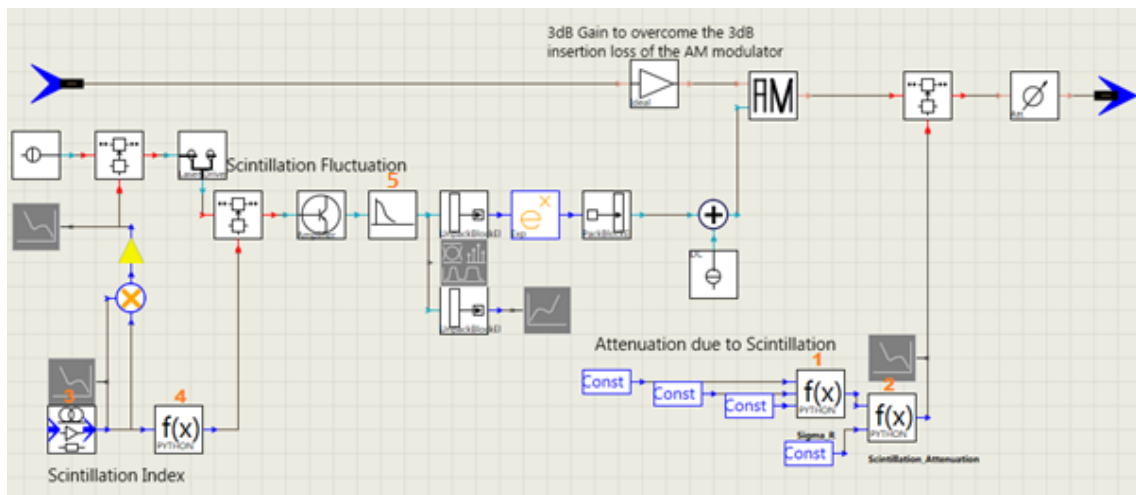


Figura 4.1 :Módulo VPI - FS_Scintillation

Os valores pré-definidos para este bloco estão presentes na seguinte tabela:

Comprimento	1000 m
Cn ²	5e-12
Comprimento de Onda	1.55e-6 m
Raio da Cintura do Feixe	2e-2 m
Abertura Recetor	10e-2 m
Velocidade do Vento	10 m/s
Largura Espetral da Cintilação	50 Hz

Tabela 4.1 : Parâmetros pré-definidos do FS_Scintillation

No ponto 1 da figura 4.1 é calculada a variância de Rytov (equação 18) para servir de apoio ao ponto 2 que calcula a atenuação devido à cintilação através da equação 27.

No ponto 3 encontra-se um módulo que calcula o índice de cintilação (equação 22), que com o apoio do ponto 4, vão auxiliar a estruturação das flutuações existentes no sinal devido à cintilação.

No ponto 5 é utilizado um filtro passa-banda, com uma largura de banda igual à “Largura Espetral da Cintilação”, com frequência central dada pela seguinte expressão: [23]

$$\frac{Velocidade\ do\ Vento}{\sqrt{Comprimento}} * \frac{Comprimento\ de\ Onda}{2 * \pi} \quad \text{Equação 28}$$

O módulo FSO além dos efeitos da cintilação do bloco FS_Scintillation contempla as atenuações atmosféricas e geométricas, sendo este um modelo mais completo.

4.1.2 Resultados

Efeitos da Cintilação num sinal NRZ-00K

De forma a perceber o comportamento de uma ligação FSO com a cintilação, foi simulado um esquema usando o módulo FS_Scintillation, com um sinal NRZ-OOK de 10Gbps. O esquemático pode ser visto na figura seguinte:

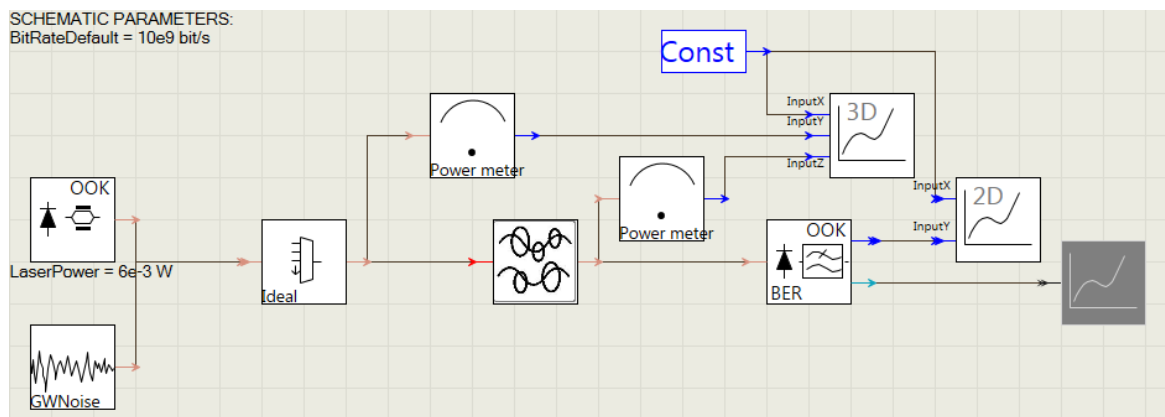


Figura 4.3 : Esquema de simulação da cintilação num sinal NRZ-OOK

O sinal NRZ usado tem uma taxa de 10Gbps e comprimento de onda de 1550 nm. O diâmetro do recetor foi de 3 cm, a velocidade do vento 10 m/s e a largura espectral de cintilação 50 Hz e 3.35 dBm de potência à saída da emissão. O *sample rate* utilizado foi de 160×10^9 Hz. O comprimento da ligação e o C_n^2 foram comutados de forma a registar perdas de potência e o BER. Os resultados obtidos por esta simulação são os seguintes:

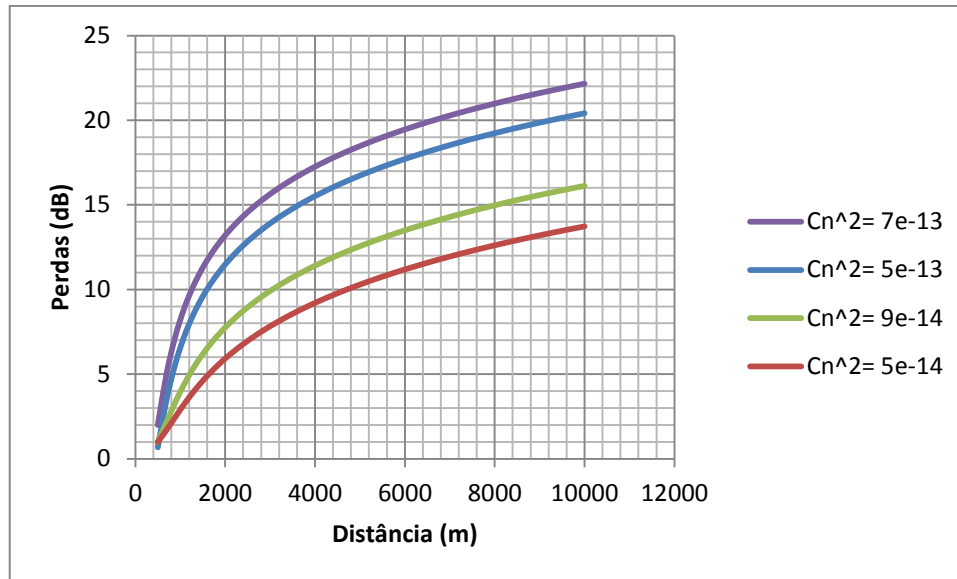


Figura 4.4 : Perdas vs Distância para diferentes C_n^2

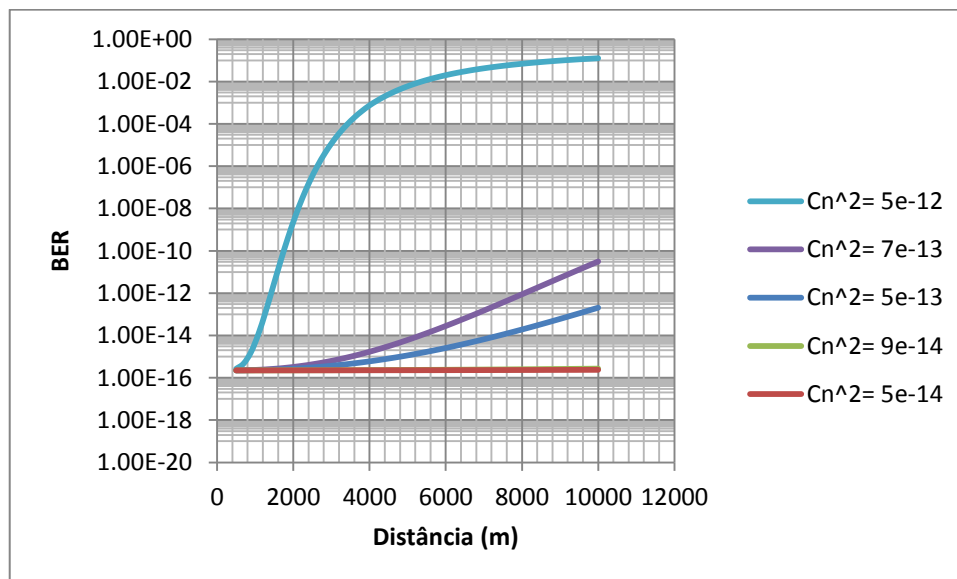


Figura 4.5 : BER vs Distância para diferentes C_n^2

As figuras 4.4 e 4.5 mostram que aumentando o comprimento da ligação, existe um aumento das perdas de potência, e estas são superiores para valores de C_n^2 maiores. O BER tem um comportamento semelhante, aumentando o seu valor para distâncias superiores e existindo um impacto negativo neste com o crescimento do C_n^2 .

Enquanto um C_n^2 de $5 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ (turbulência muito forte) leva a uma grande alteração do BER para distâncias até 10 km, para C_n^2 de $7 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ e $5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ a

alteração do BER com a distância é menor. Nos valores de $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ e $9 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, o BER pode ser considerado constante.

É importante referir que o valor do BER encontra-se limitado a 1×10^{-16} , devido ao “noise floor” imposto pelo ruído elétrico associado ao recetor, limitando o sistema *back-to-back* a esse valor.

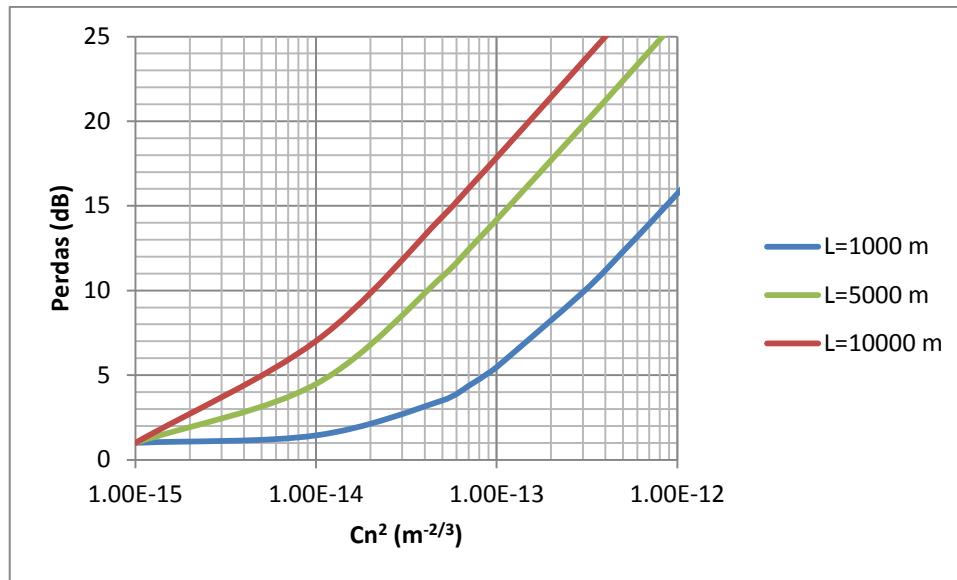


Figura 4.6 : Perdas vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação

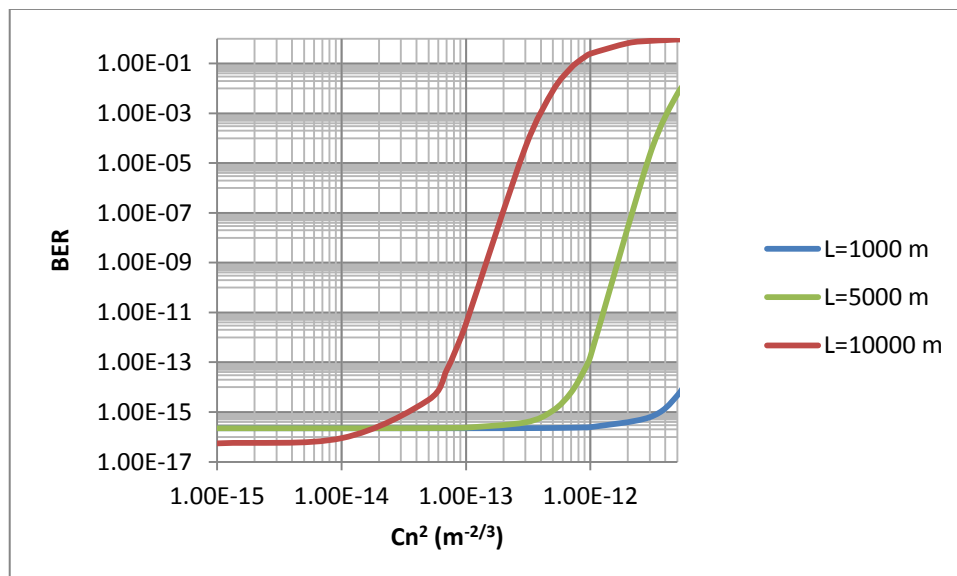


Figura 4.7 : BER vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação

Analisando os gráficos 4.6 e 4.7 é de referir o evidente aumento das perdas e do BER, com o crescimento da turbulência. Para grandes distâncias, o impacto que o C_n^2 tem sobre o sistema é maior, demonstrando que o problema da cintilação evidencia-se para grandes distâncias. O pior dos casos, como era de esperar são os 10 km, porque o sinal fica sujeito á cintilação/turbulência num comprimento maior.

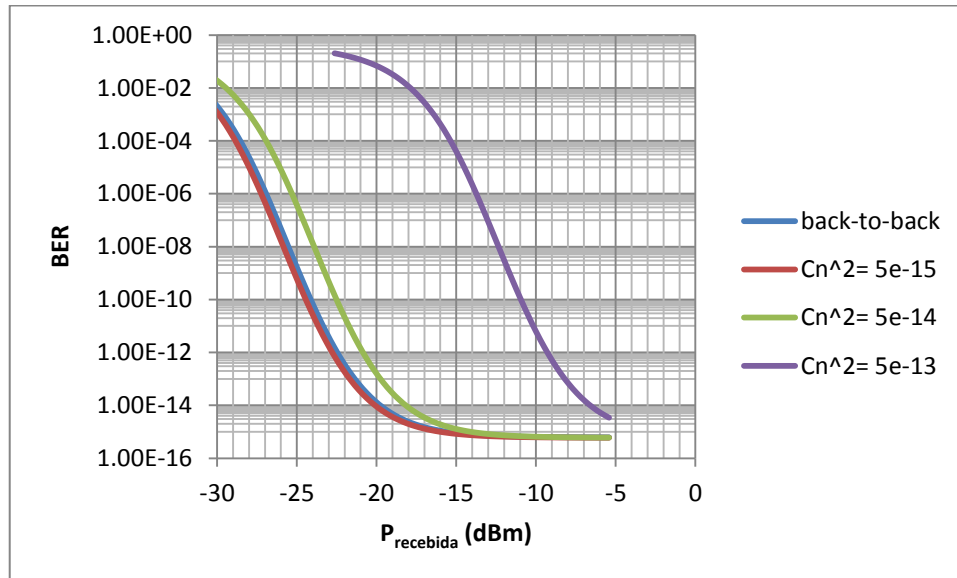


Figura 4.8 : BER vs potência recebida para diferentes C_n^2 e $L=5000$ m

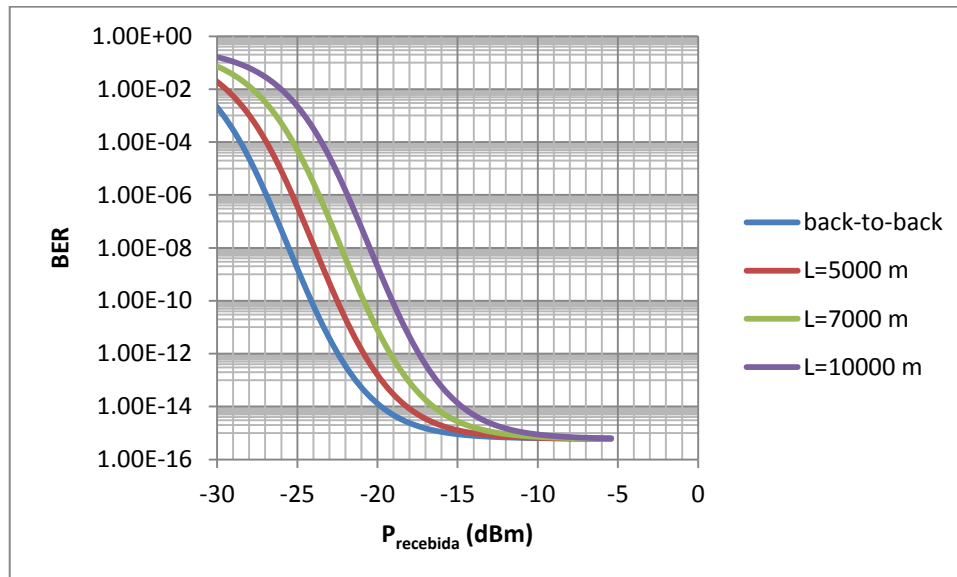


Figura 4.9 : BER vs potência recebida para diferentes comprimentos de ligação e $C_n^2= 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

Nos gráficos 4.8 e 4.9 mostram que se obtém uma diminuição do BER com o aumento da potência recebida, pois está-se a aumentar o SNR. Mas além deste facto, para a mesma potência recebida obtêm-se diferentes BERs, considerando comprimentos e C_n^2 diferentes, demonstrando que existem outros efeitos introduzidos além da atenuação, sendo um deles a turbulência.

Considerando um BER limite de 1×10^{-3} , a potência necessária no recetor para obter esse resultado utilizando um comprimento de ligação de 10 km é superior à de 7 e 5 km. Enquanto nos 10 km são necessários aproximadamente -25 dBm, nos 7 km são -27 dBm e nos 5 km -29 dBm.

Para o mesmo valor de BER (1×10^{-3}), a potência necessária no recetor utilizando um C_n^2 de $5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ e um comprimento de ligação de 5 km, praticamente não se altera em relação ao *back-to-back* (-30 dBm). Quando o C_n^2 passa para $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ a potência necessária passa a ser maior (-28.5 dBm). Utilizando turbulência forte ($C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$), esse valor aumenta para os -17dBm.

Efeitos da Cintilação num sinal 16-QAM

De forma a perceber como um sinal 16-QAM a 10 Gbps era afetado pela cintilação, foi simulado um esquema usando o módulo FS_Scintillation:

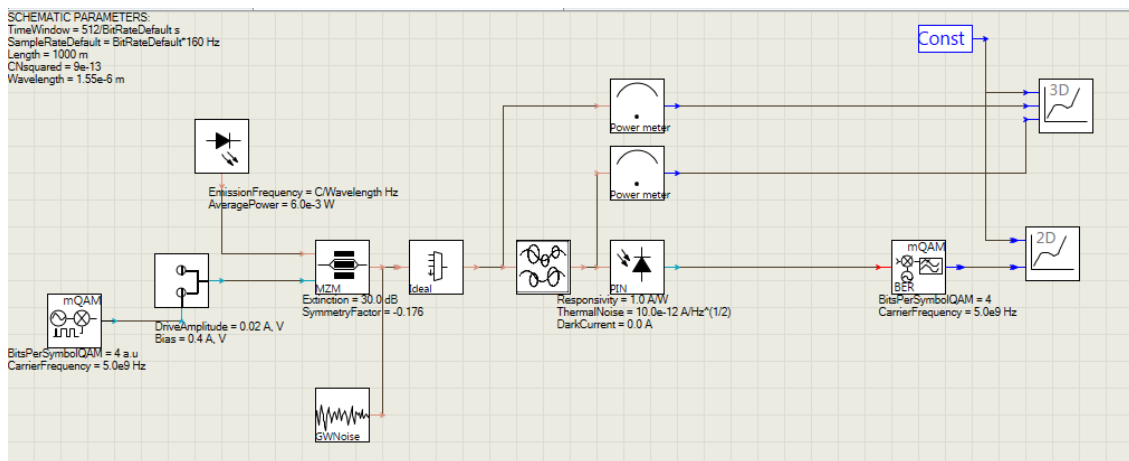


Figura 4.10 : Esquema de simulação da cintilação num sinal 16-QAM

O sinal 16-QAM usado tem uma taxa de 10 Gbps e comprimento de onda de 1550 nm. O diâmetro do recetor foi de 3 cm, a velocidade do vento 10 m/s e a largura espectral

de cintilação 50 Hz e uma potência na emissão de 3.35 dBm. O *sample rate* era igual a 160 vezes o *bitrate*. O comprimento da ligação e o C_n^2 foram comutados de forma a registrar perdas de potência e o SER. Os resultados obtidos por esta simulação estão listados abaixo:

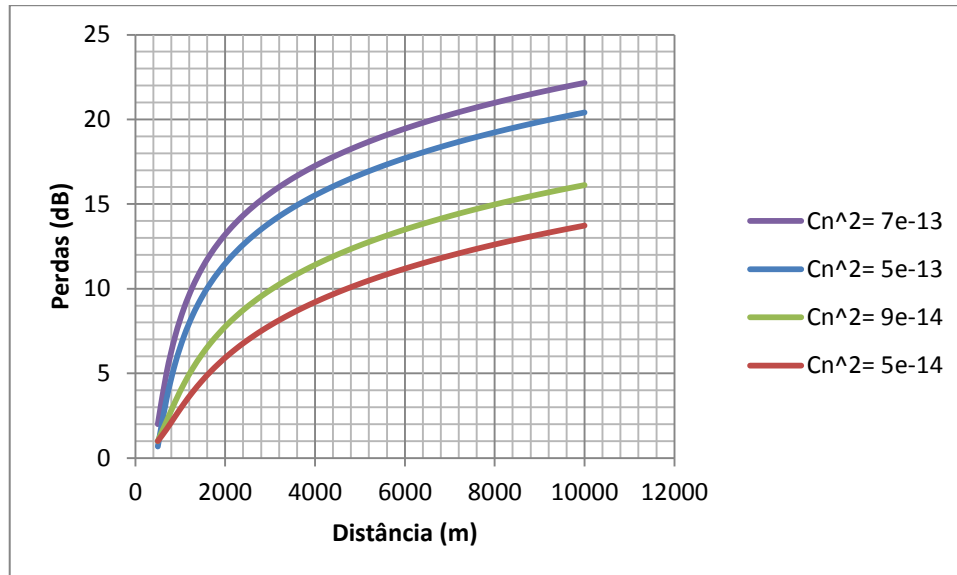


Figura 4.11 : Perdas vs Distância para diferentes C_n^2

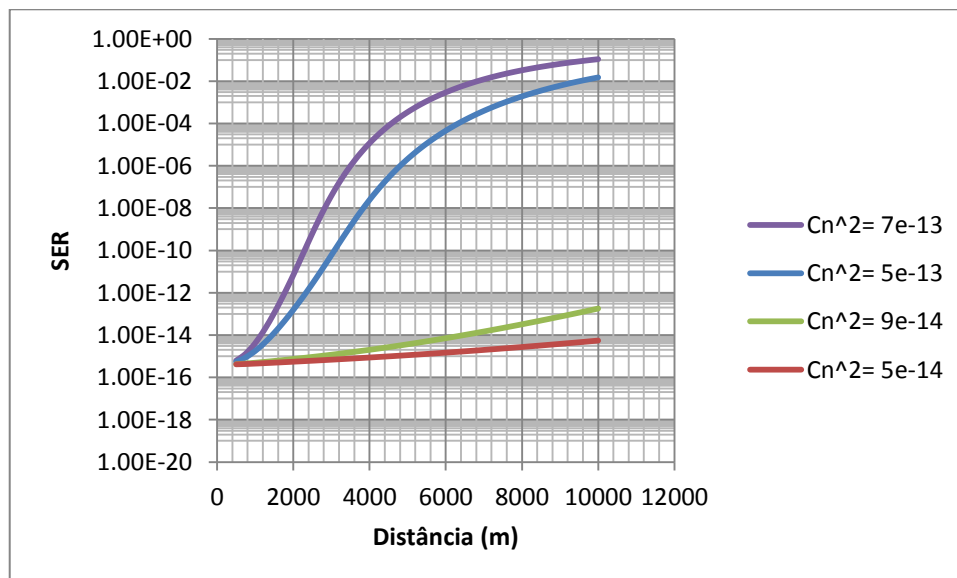


Figura 4.12 : SER vs Distância para diferentes C_n^2

Comparando as perdas obtidas no 16-QAM (figura 4.11) com o NRZ (figura 4.4) verifica-se que elas são iguais, concluindo que as perdas aplicadas pela cintilação são independentes do formato de modulação utilizado.

Tendo em conta que o $SER \leq BER$, ou seja, no melhor dos casos $SER=BER$, equiparando a figura 4.12, com a 4.5, o C_n^2 provoca uma degradação maior no 16-QAM do que no NRZ. Enquanto no NRZ para valores de C_n^2 de 9×10^{-14} e $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ não existiam alterações do BER, para 16-QAM o SER altera-se.

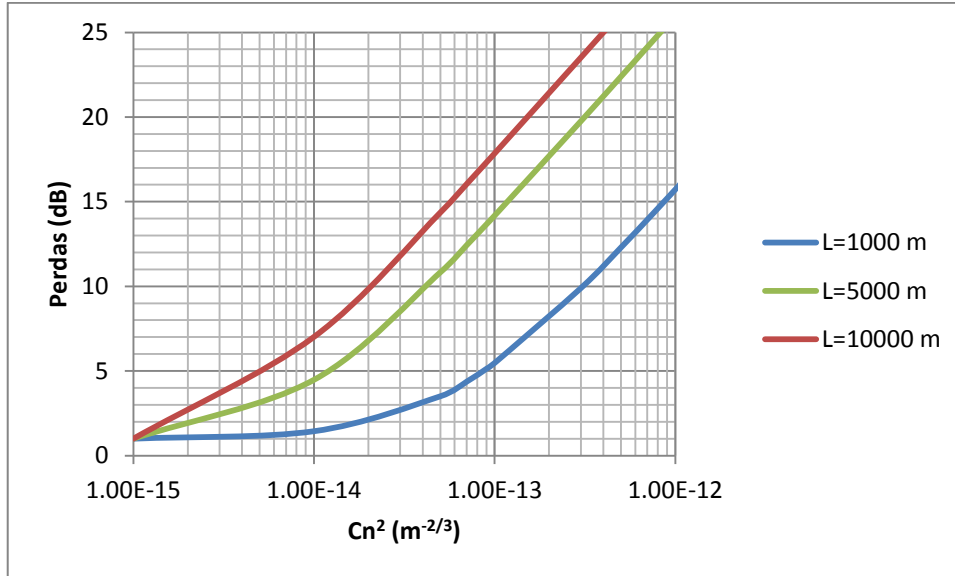


Figura 4.13 : Perdas vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação

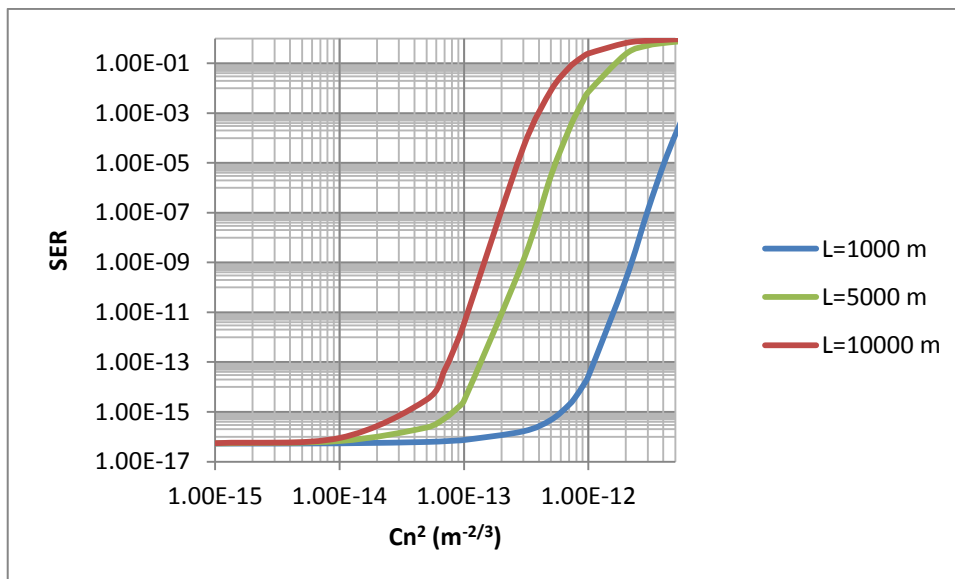


Figura 4.14 : SER vs C_n^2 para diferentes comprimentos de ligação

O 16-QAM (figura 4.13), apresenta as mesmas perdas que o sinal NRZ (figura 4.6) quando aplicados os mesmos fatores.

Analisando o gráfico 4.13 é demonstrado, que o 16-QAM, acompanha a mesma tendência já demonstrada pelo sinal NRZ (figura 4.7). Apesar disto, o sinal 16-QAM apresenta uma deterioração do sinal muito maior que o sinal NRZ. Por exemplo para um comprimento de ligação de 5 km e um BER limite de 1×10^{-3} , o 16-QAM suportaria um valor de C_n^2 de $8 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, para o NRZ-OOK obter-se-ia um C_n^2 de $4 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$, ou seja um fator de turbulência mais forte.

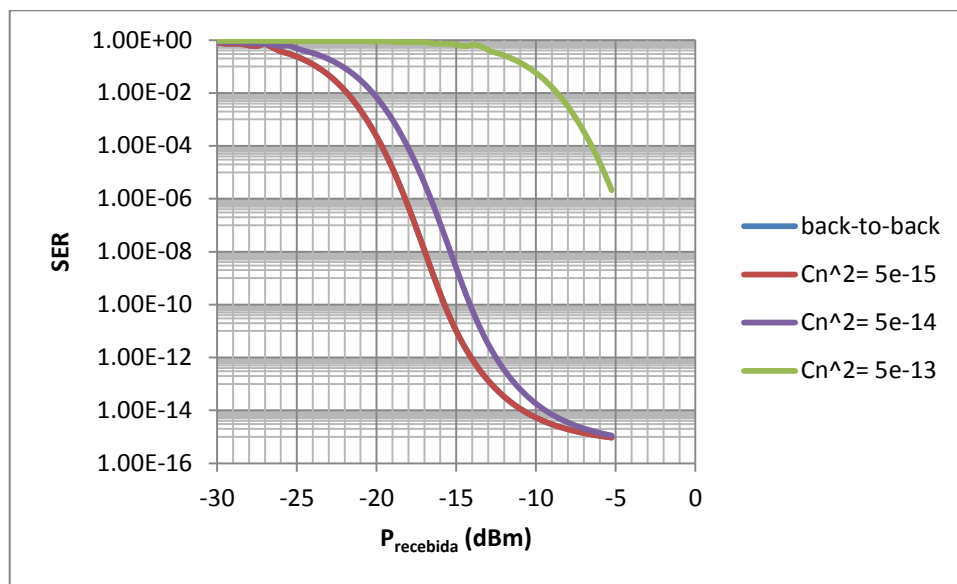


Figura 4.15 : SER vs Potência recebida para diferentes C_n^2 e $L=5000 \text{ m}$

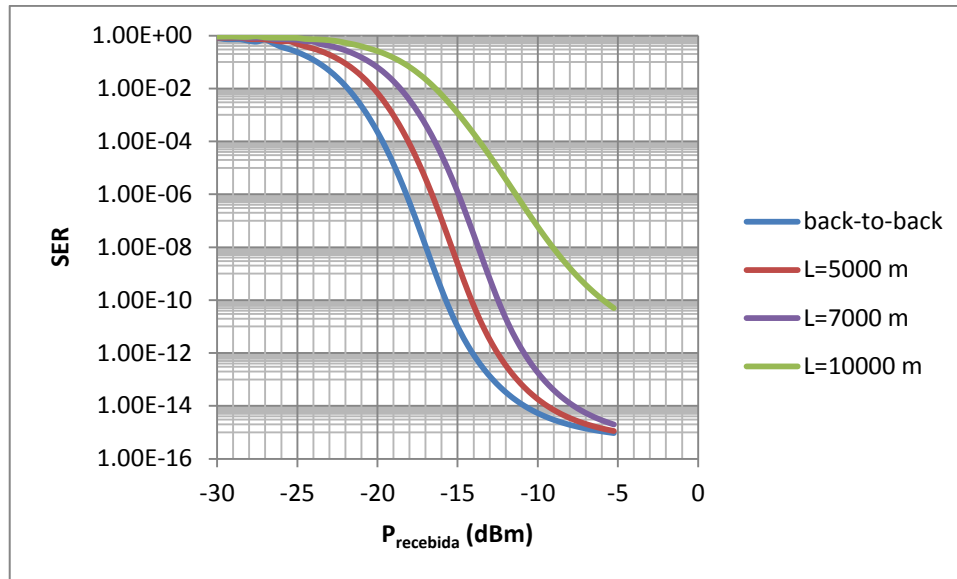


Figura 4.16 : SER vs Potência recebida para diferentes comprimentos de ligação e $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

Comparando os valores de sensibilidade obtidos no NRZ (figuras 4.8 e 4.9) e no 16-QAM (figuras 4.15 e 4.16), obtiveram-se os seguintes resultados para um BER limite de 1×10^{-3} :

Formato de modulação	Comprimento de ligação	Sensibilidade
NRZ-OOK	5000 m	-28.5 dBm
16-QAM		-18.0 dBm
NRZ-OOK	7000 m	-27.0 dBm
16-QAM		-16.5 dBm
NRZ-OOK	10000 m	-25.0 dBm
16-QAM		-14.0 dBm

Tabela 4.3: Comparação da sensibilidade entre NRZ-OOK e 16-QAM para diferentes comprimentos de ligação

Formato de modulação	C_n^2	Sensibilidade
NRZ-OOK	$5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$	-30.0 dBm
16-QAM		-20.0 dBm
NRZ-OOK	$5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$	-28.5 dBm
16-QAM		-18.0 dBm
NRZ-OOK	$5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$	-17.0 dBm
16-QAM		-14.0 dBm

Tabela 4.4 : Comparação da sensibilidade entre NRZ-OOK e 16-QAM para diferentes C_n^2

Daqui retira-se que a potência necessária para obter um BER de 1×10^{-3} no recetor, é maior no 16-QAM do que no NRZ. Isto explica-se por o 16-QAM a informação estar mais compactada.

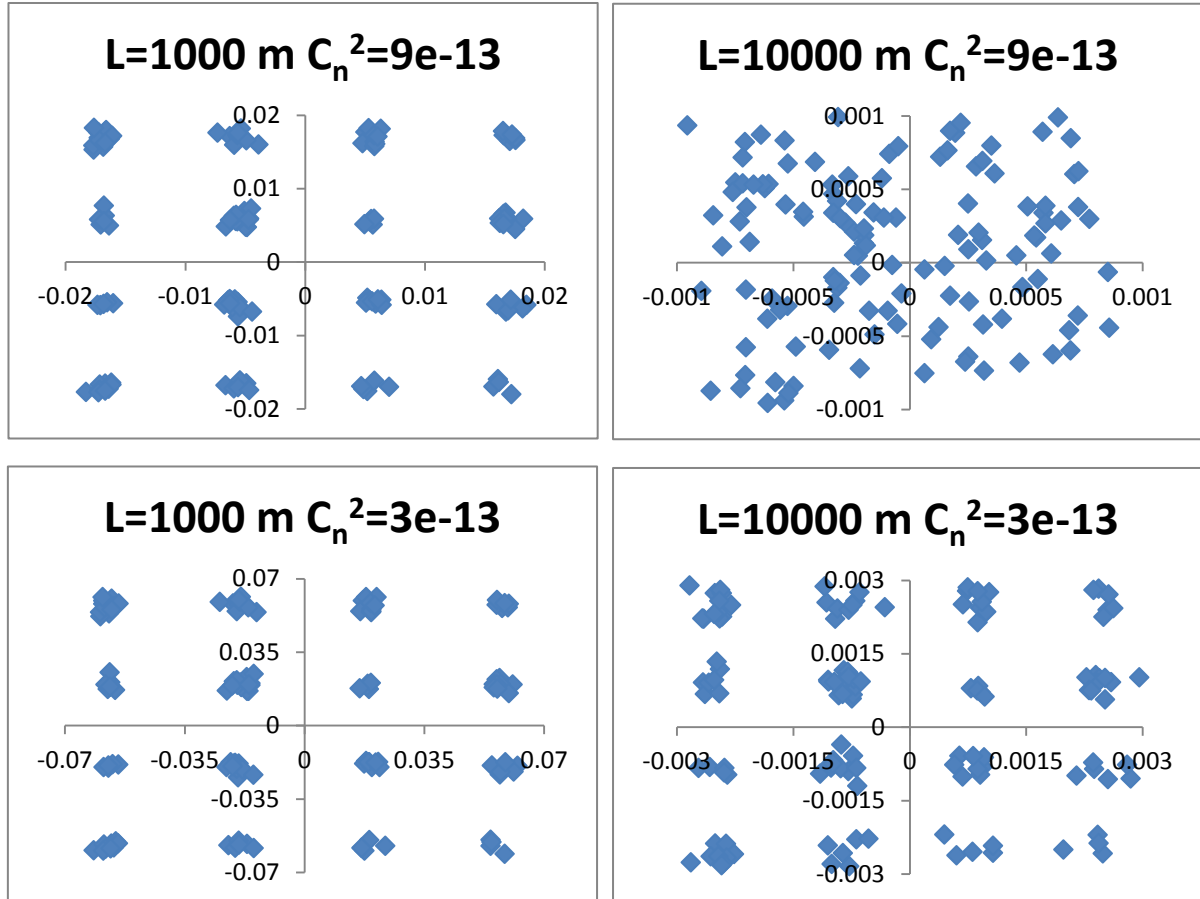


Figura 4.17 : Constelação 16-QAM para diferentes comprimentos de ligação e C_n^2

A figura 4.17 mostra a degradação do sinal com a cintilação. Quando a distância e/ou a turbulência aumentam, a constelação degrada-se. É demonstrado também que o impacto da cintilação em comprimentos de ligação FSO pequenos, é menor do que para comprimentos de ligação maiores. Por exemplo para o comprimento de ligação de 10 km e $C_n^2 = 9 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, o sinal seria impossível de recuperar, enquanto para o $C_n^2 = 9 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ a possibilidade de receber o sinal ainda é uma realidade.

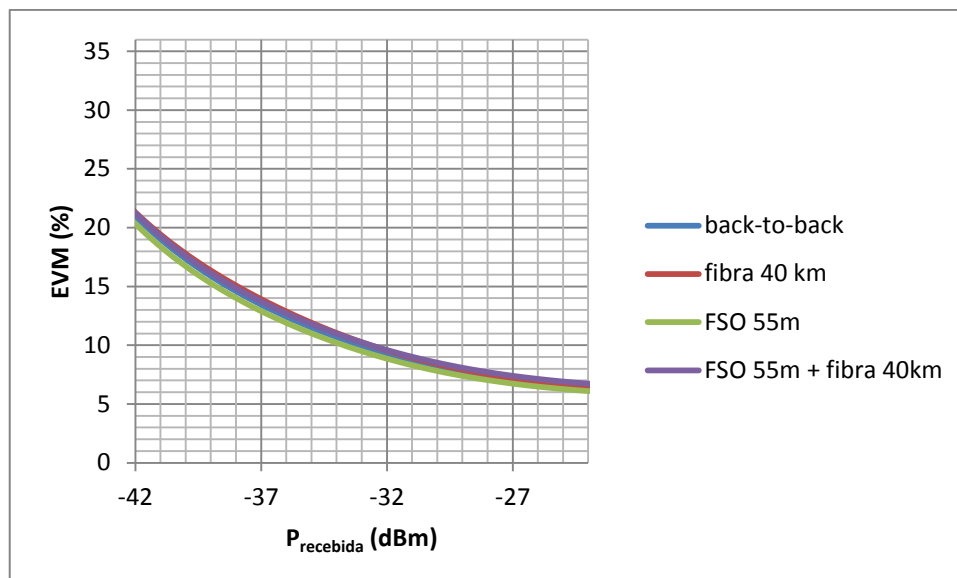


Figura 4.19 : EVM vs Potência recebida para 10 Gbps

Para 10 Gbps todos os sinais têm um comportamento semelhante como se pode ver pela figura 4.19, sendo um resultado muito bom porque todos se encontram muito próximos do sistema *back-to-back*. Isto deve-se à aplicação da DSP, que explicando numa forma simples, efetua compensações, levando ao aperfeiçoamento do sinal e consequentemente à obtenção de melhores resultados.

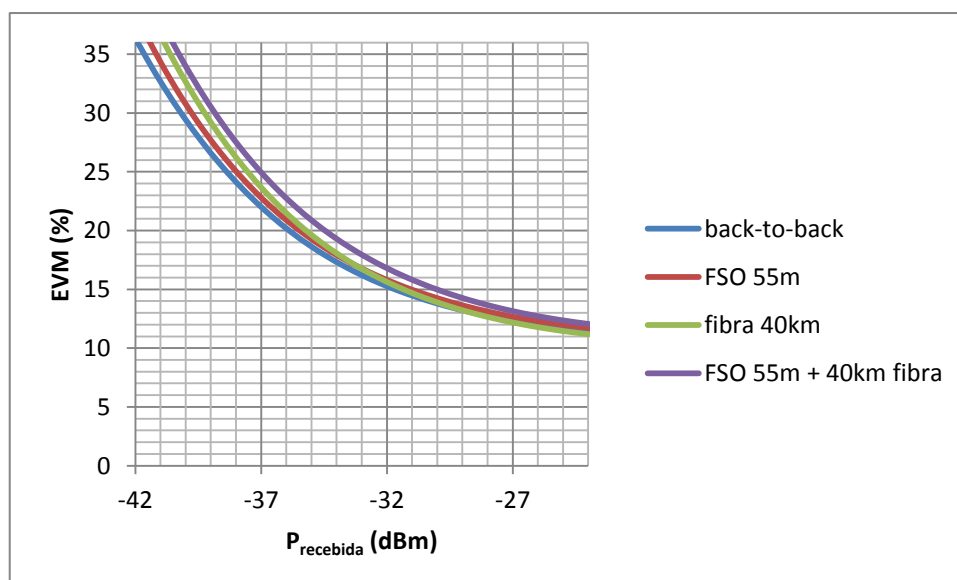


Figura 4.20 : EVM vs Potência recebida para 40 Gbps

Utilizando 40 Gbps já se conseguem denotar divergências no EVM provocadas pelo sistema FSO e pela fibra, apesar deste facto, os valores ainda se encontram muito

próximos do *back-to-back*, demonstrando que a utilização de uma DSP neste sistema é uma mais-valia.

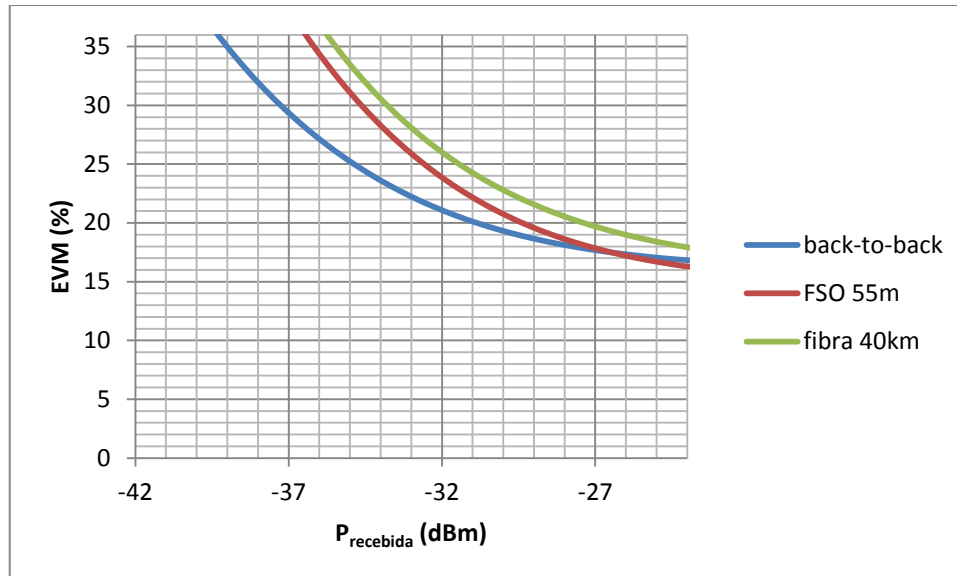


Figura 4.21 : EVM vs Potência recebida para 100 Gbps

Empregando 100 Gbps, a exigência pedida ao sistema é maior, levando à deterioração deste quando aplicado o sistema FSO e a fibra. Para um *bitrate* desta gama, a deterioração do resultado começa a evidenciar-se mesmo com a presença de uma DSP.

Para o passo seguinte o comprimento da ligação FSO foi alterado para 1 km e não foi utilizada fibra.

A aplicação de um ângulo de divergência do feixe tão grande como o do anterior não seria possível devido às perdas que isso implicaria. Devido a esse facto, foi alterado para 1/e (referência para um feixe gaussiano).

Aplicando as alterações anteriores, obteve-se o seguinte resultado:

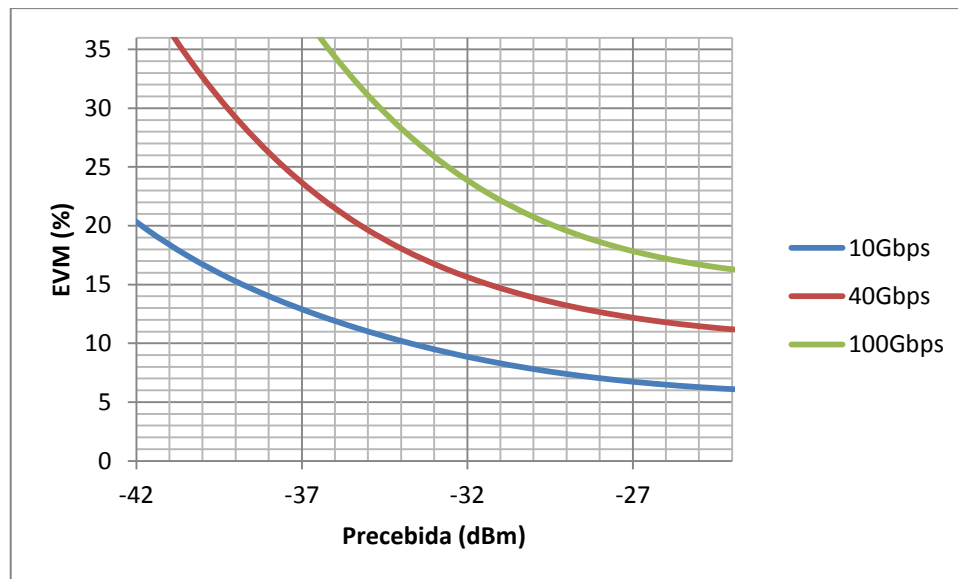


Figura 4.22 : EVM vs Potência recebida para um comprimento de ligação de 1 km

Da figura 4.22 deve-se ter em conta que um BER referência de 1×10^{-3} corresponde a um EVM de 32.5 para um sinal QPSK. [24]

<i>Bitrate</i>	Sensibilidade
10 Gbps	<-42 dBm
40 Gbps	-40 dBm
100 Gbps	-35.5 dBm

Tabela 4.5: Sensibilidade para diferentes *bitrates* de um sinal DP-QPSK

O aumento do *bitrate* de um sinal DP-QPSK leva a uma deterioração do sinal, mas um facto curioso, consiste na obtenção de um resultado semelhante a uma ligação FSO de 55 m. Esta ocorrência deve-se á introdução de uma turbulência média/fraca que como visto nas simulações anteriores, pouco afeta o sinal para este tipo de distâncias e a introdução de uma DSP no sistema facilmente corrige as discrepâncias apresentadas.

Aplicação do TWDM sobre FSO

Uma das tecnologias mais promissoras do NG-PON2 é o TWDM, por isso, verificou-se a compatibilidade deste com o sistema FSO efetuando a seguinte simulação:

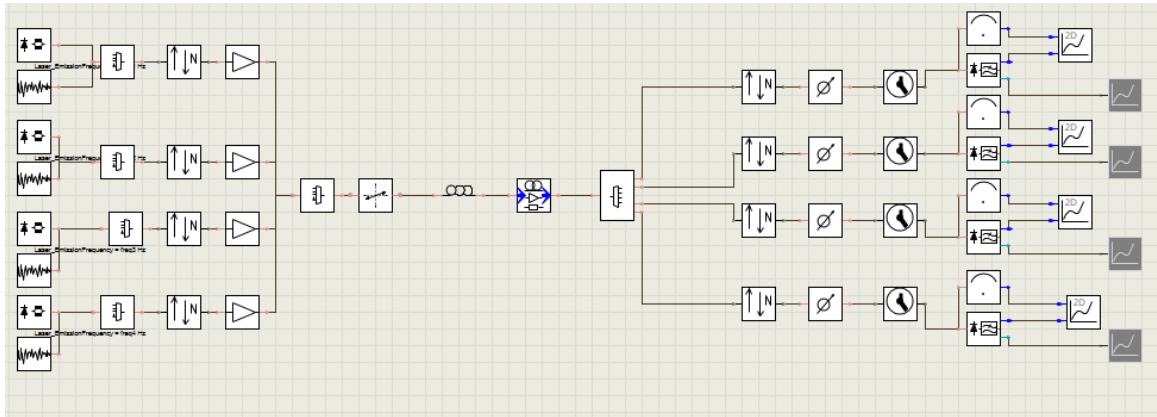


Figura 4.23 : Esquema de simulação de TWDM sobre fibra e FSO

O esquema tem quatro lasers que enviam um sinal NRZ, cada um tem à saída 6 dBm e utilizam comprimentos de onda diferentes da banda C (1555.75 nm, 1556.55 nm, 1557.3 nm e 1558.17 nm). Na recepção é feita a seleção do canal pretendido filtrando no comprimento de onda a que ele pertence. Cada sinal NRZ tem um *bitrate* de 10 Gbps, levando a que o sistema TWDM perfaça 40 Gbps no sentido *downstream*. No sentido *upstream*, cada sinal NRZ tem 2.5Gbps, levando a 10 Gbps no TWDM. O *sample rate* é de 32x*bitrate*.

Para simular o sistema em espaço livre foi utilizado o módulo FSO. Inicialmente foi testada uma ligação FSO de 55m e utilizaram-se fibras de 20 e 40 km. Obtiveram-se os seguintes resultados:

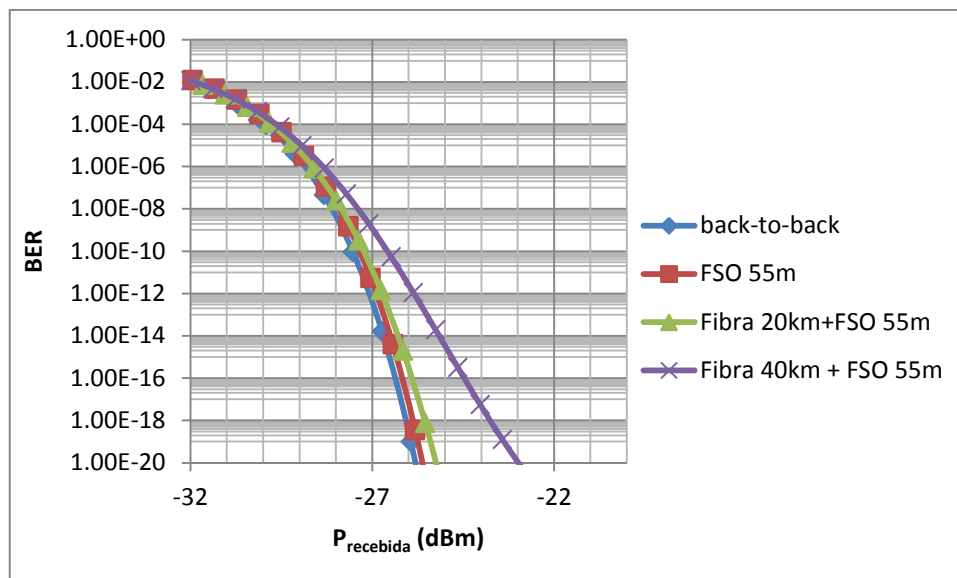


Figura 4.24 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm downstream

Analisando a figura 4.24, retém-se que a introdução do FSO no sistema, não provoca grandes alterações de BER. O mesmo se pode dizer da fibra de 20 km em conjunto com o sistema FSO de 55 m, podendo mesmo afirmar que é idêntico ao sistema *back-to-back*.

Considerando um BER limite de 1×10^{-3} todos os esquemas utilizados (*back-to-back*, FSO e FSO+Fibra) apresentam uma sensibilidade de aproximadamente -31 dBm.

Para a próxima fase foi necessário alterar o ângulo de divergência para 1/e miliradianos (padrão para um feixe gaussiano), porque para distâncias de 1 km ou superior no FSO, se o ângulo de divergência tivesse um valor elevado, as perdas seriam enormes e não se receberia o sinal.

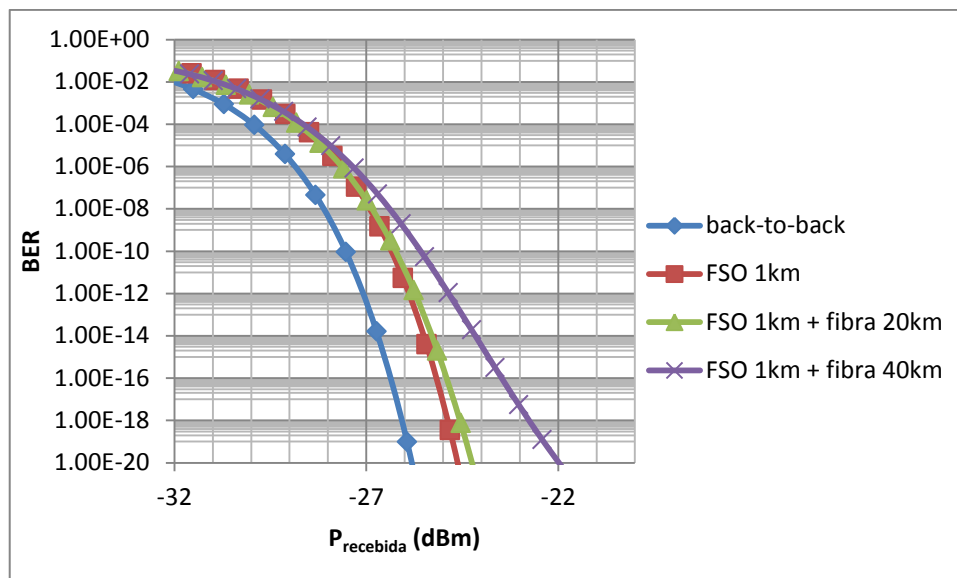


Figura 4.25 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm downstream

Considerando um valor limite de $BER=1 \times 10^{-3}$, e analisando a figura 4.25 obtiveram-se os seguintes resultados:

Sistema	Sensibilidade
<i>Back-to-back</i>	-31.5 dBm
FSO 1 km	-30.5 dBm
FSO 1 km + fibra 20 km	-30.5 dBm
FSO 1 km + fibra 40 km	-30.5 dBm

Tabela 4.6 : Sensibilidade para diferentes *setups* de um sinal NRZ (TWDM)

A aplicação do FSO levou à alteração de 1 dB na sensibilidade em relação ao *back-to-back*. A introdução de fibra não causou diferenças de sensibilidade comparando exclusivamente com o FSO.

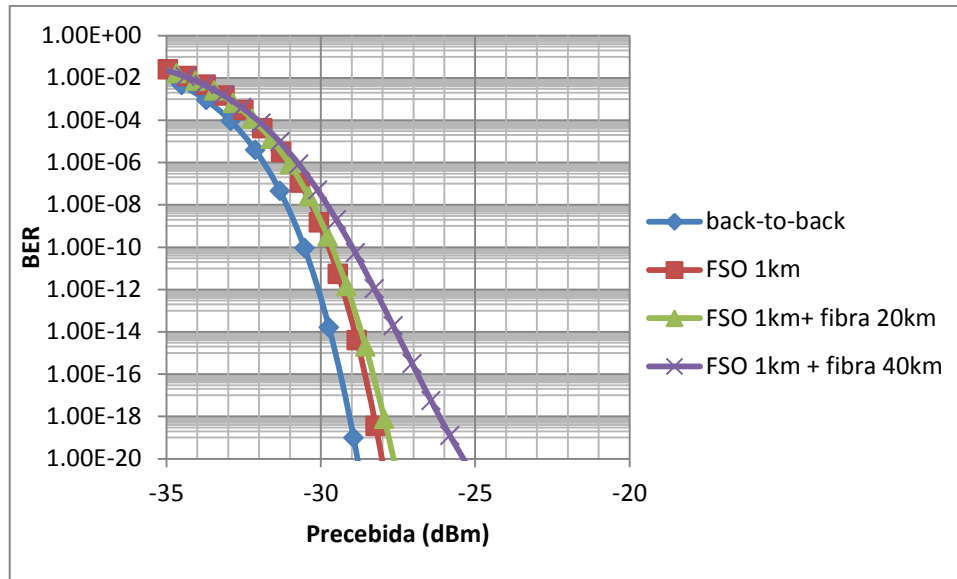


Figura 4.26 : BER vs Potência recebida para 1557.3 nm upstream

No *upstream* como o *bitrate* é menor, a sensibilidade obtida para todos os tipos de *setups* é igual para um BER de 1×10^{-3} ou seja, -34 dBm.

Comparando com o *downstream* verifica-se que a potência necessária no recetor para obter o mesmo resultado de BER é menor no *upstream*.

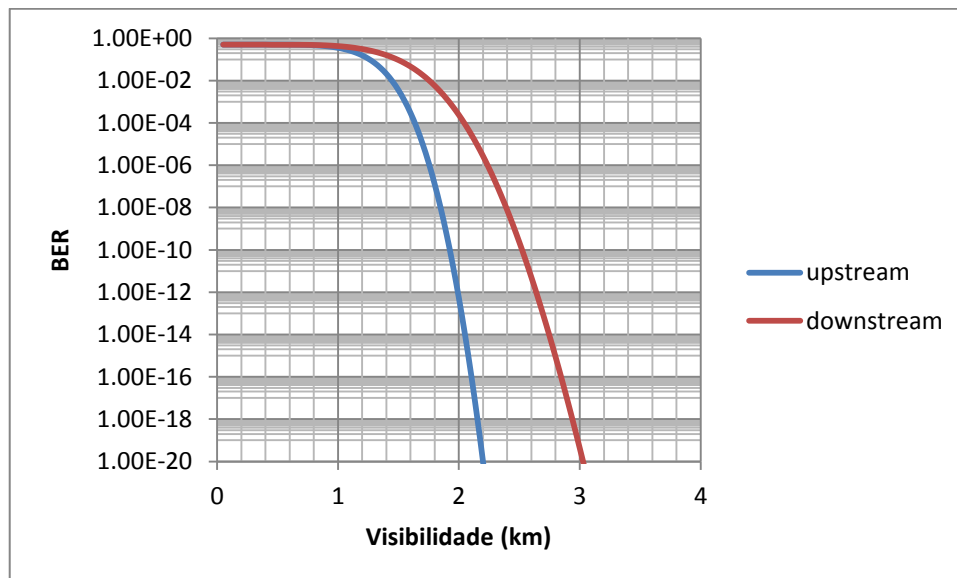


Figura 4.27 : BER vs Visibilidade para 1557.3 nm e FSO de 1 km

Come se pode ver pela figura 4.27, a visibilidade é um dos pontos-chave de uma ligação FSO. Uma conexão de 1 km para resultar, nunca poderia ter um campo de visão inferior a este valor, e mesmo muito próximo seria difícil a deteção do sinal.

Analisando a figura, contempla-se que neste caso específico, só se obteriam valores de $BER=1 \times 10^{-3}$ para visibilidades superiores a 1.5 km no sentido *upstream* e pelo menos 1.8 km no sentido *downstream*.

4.2 Resultados Laboratoriais

4.2.1 Equipamento



Figura 4.28 : Transmissor

O transmissor do sistema FSO consiste num colimador que foca o laser, transmitindo-o pelo ar. Nas experiências laboratoriais, o colimador tem inserido um sistema de espelhos e não de lentes.

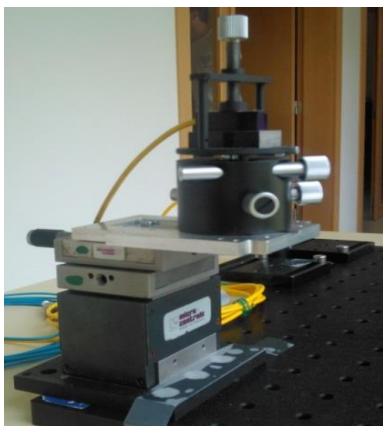


Figura 4.29 : Recetor

O recetor arrecada o laser, utilizando-o para diversas finalidades como o envio para a fibra.



Figura 4.30 : Lente

A lente utilizada é convergente. Utiliza-se para focar o feixe no recetor, reduzindo as perdas associadas à atenuação geométrica.

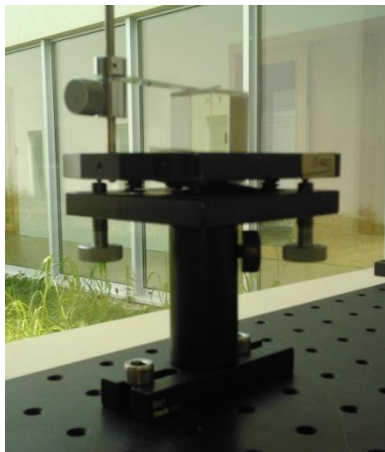


Figura 4.31 : PBS

O *splitter* ótico 1:2 (PBS-*polarization beam splitter*) depende muito da polarização utilizada. Como é feito de vidro e é dependente de reflexões, as perdas que impõe são superiores a 3 dB.



Figura 4.32 : Espelho

O espelho foi a forma encontrada para aumentar o comprimento da ligação. Sendo este um espelho plano, ele recebe o feixe de luz e reflete-o para o local desejado.

4.2.2 Setup FSO

Para analisar as perdas provocadas numa primeira fase pelos elementos presentes numa ligação FSO, foram criados os seguintes *setups*:

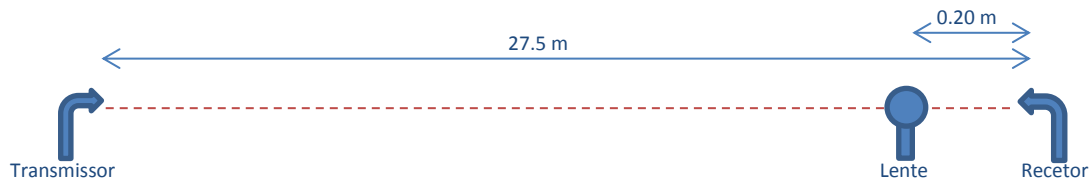


Figura 4.33 : FSO Setup 1

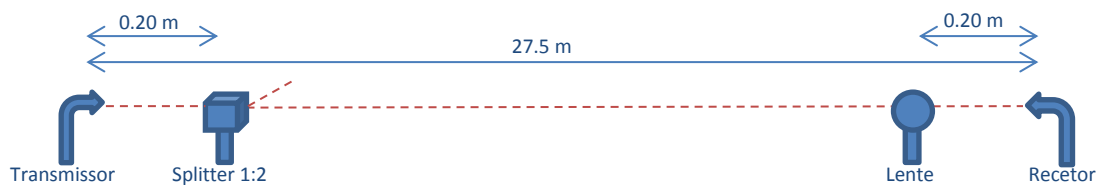


Figura 4.34 : FSO Setup 2



Figura 4.35 : Esquema real do FSO Setup 2

Nesta primeira montagem, o laser é enviado pelo colimador (transmissor), passa por um PBS 1:2, transpondo um dos dois feixes de luz pelo espaço livre e acertando na lente, convergindo a luz para um único ponto (ponto focal) no recetor. O comprimento entre o transmissor e o recetor é de 27,5 m. O transmissor tem uma distância do PBS de 20 cm, tal como a lente do recetor.

Para aumentar o comprimento da ligação criaram-se os seguintes *setups*:

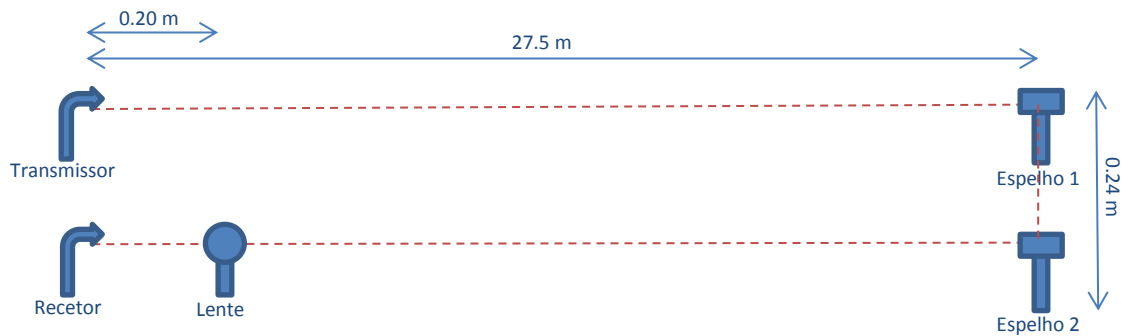


Figura 4.36 : FSO Setup 3

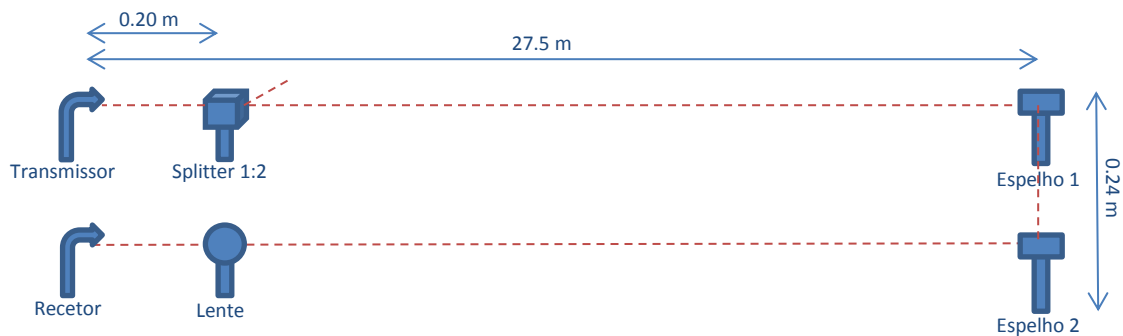


Figura 4.37 : FSO Setup 4



Figura 4.38 : Esquema real do FSO Setup 4

Neste segundo esquema, o emissor e o recetor encontram-se lado-a-lado. O colimador envia o laser, que cruza um PBS 1:2, seguindo-se o espaço livre e acertando num primeiro espelho que reflete o feixe para um segundo espelho a 30 cm deste. O segundo espelho reenvia o feixe de volta passando pelo espaço livre e acertando na lente

convergente que foca o raio de luz num único ponto no recetor. O transmissor e o recetor encontram-se respetivamente a 20 cm do PBS e da lente. Os dois espelhos encontram-se a 27cm um do outro.

Este esquema leva a um aumento da distância entre o emissor e o recetor para o dobro, ou seja aproximadamente 55m.

4.2.3 Resultados

Perdas no alinhamento

Para alinhar o sistema foi utilizado um laser de luz visível de cor vermelha com uma potência na emissão de 0 dBm.

As perdas obtidas nos diferentes esquemas FSO são as seguintes:

Esquema	Descrição	Perdas
FSO Setup 1 (Figura 4.33)	Ligação FSO 27.5 metros sem PBS	12.5 dB
FSO Setup 2 (Figura 4.34)	Ligação FSO 27.5 metros com PBS	16.5 dB
FSO Setup 3 (Figura 4.36)	Ligação FSO 55 metros sem PBS	22.5 dB
FSO Setup 4 (Figura 4.37)	Ligação FSO 55 metros com PBS	27 dB

Tabela 4.7 : Perdas de potência para diferentes esquemas FSO

Seria de esperar que as perdas no terceiro esquema fossem o dobro ou mais do que as do primeiro esquema, mas tal não acontece porque apesar de serem inseridos dois novos elementos (espelhos), e existindo o aumento da distância e consequentemente do *spot size* com possível aumento de perdas, não existem conexões extra como o da fibra com o colimador ou o recetor com o *power meter* (já presentes no primeiro *setup*), que provocam perdas e nada têm a ver com o aumento do comprimento da ligação.

Como se verifica o PBS 1:2 não insere 3 dB de perdas no sistema, mas um valor superior (4.25 dB fazendo a média dos dois valores obtidos). Sendo constituído essencialmente de vidro e dependente da polarização do feixe existem outras perdas inerentes a este objeto, como reflexões.

Spot size

Um dos fatores mais importantes do sistema FSO consiste no *spot size* porque inerente a ele costumam existir perdas, podendo mesmo levar à não realização da conexão.

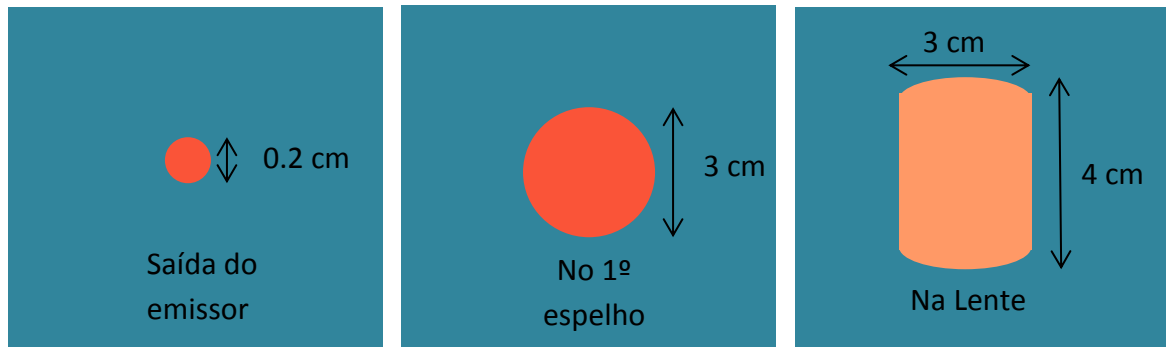


Figura 4.39 : Spot Size em diferentes pontos do Sistema FSO

A partir do *spot size* é possível retirar o ângulo de divergência do feixe utilizando a equação 20.

Pelo *spot size* no 1º espelho pode-se retirar que o ângulo de divergência é de 1.1 miliradianos.

Também é de denotar que o este valor consiste numa mera estimativa, porque conforme o sinal viaja no FSO, ele vai-se tornando mais difícil de observar, podendo levar a erros que podem providenciar um diâmetro menor do que existe na realidade.

Perdas ao longo do dia

Para verificar a evolução das perdas introduzidas ao longo do dia, montou-se o esquema representado na figura 4.37 (FSO Setup 4).

Utilizando um laser de luz visível vermelho, obtiveram-se os seguintes resultados:

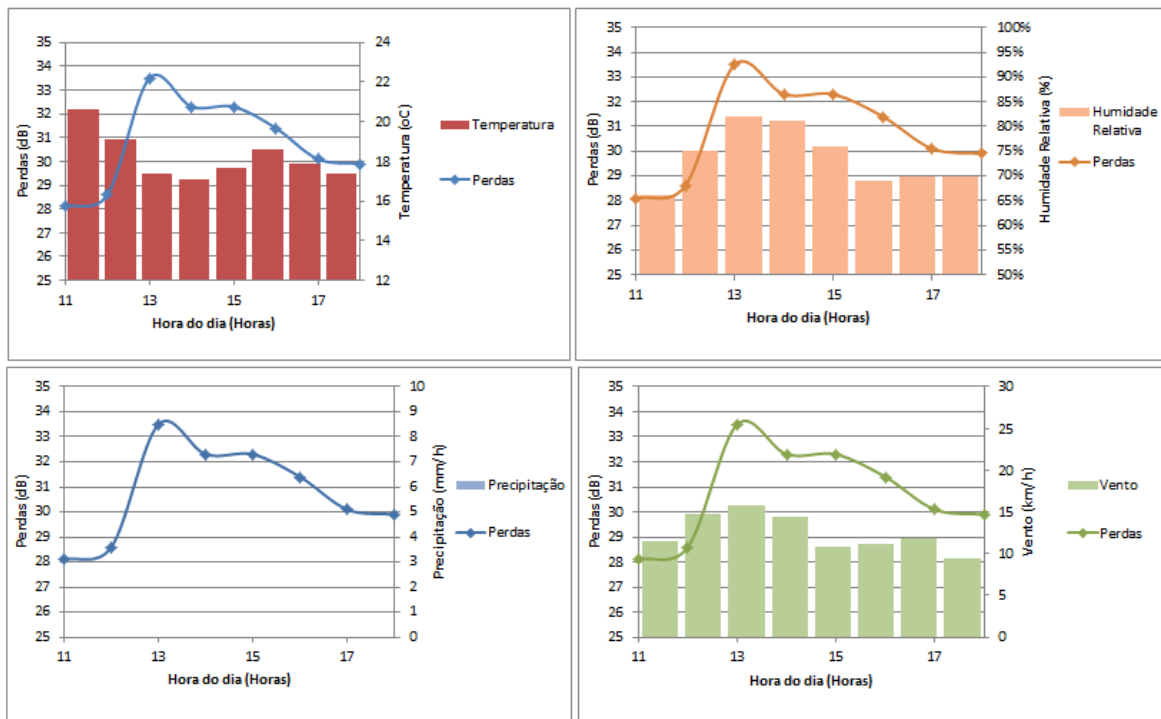


Figura 4.40 : Perdas de potência ao longo do dia 10 de Abril de 2014

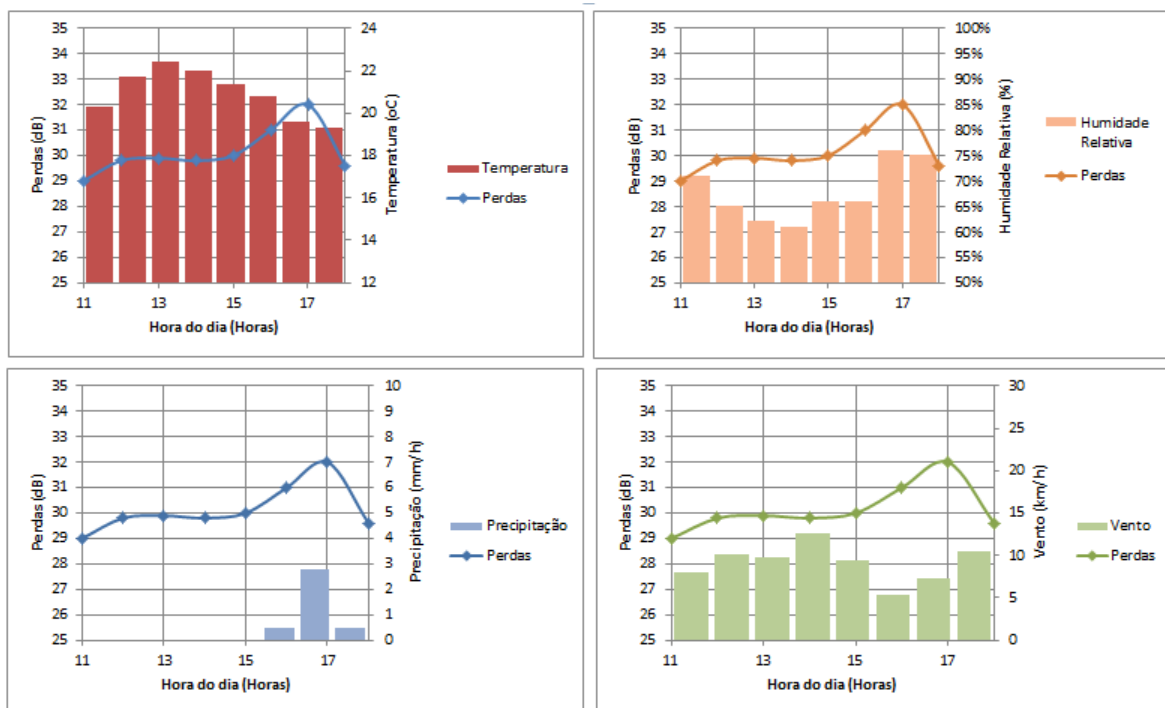


Figura 4.41 : Perdas de potência ao longo do dia 11 de Abril de 2014

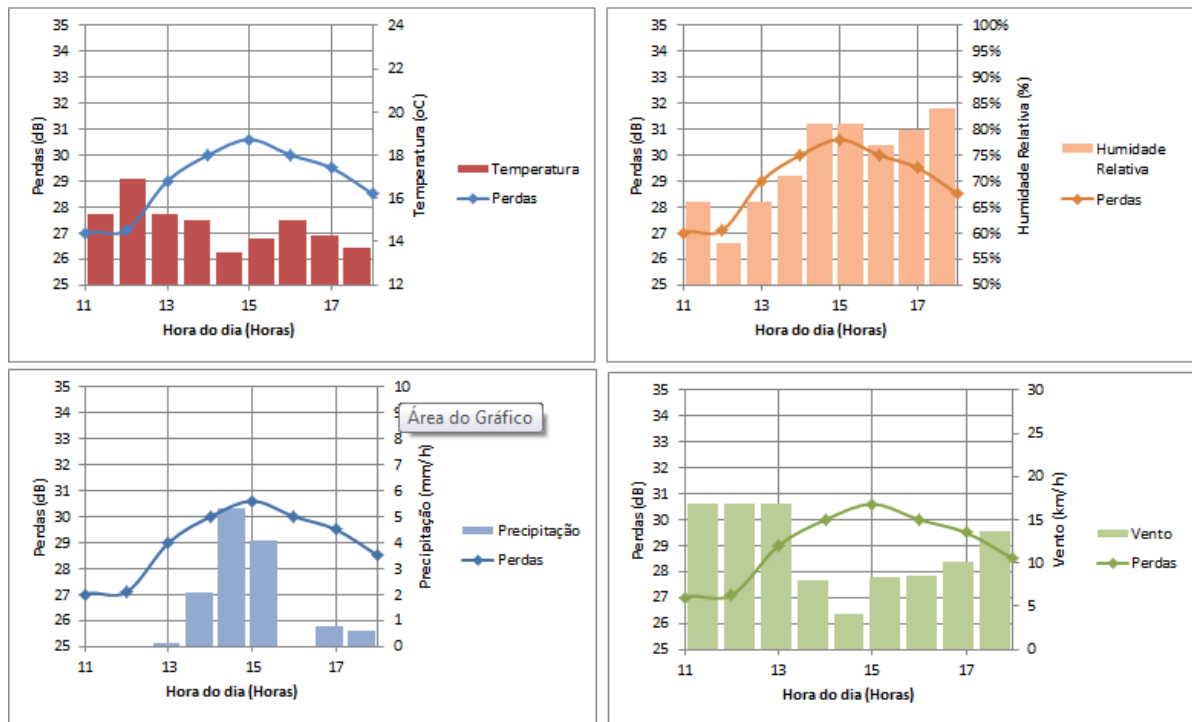


Figura 4.42 : Perdas ao longo do dia 20 de Maio de 2014

Em cada figura devem ser analisados os quatro gráficos em conjunto porque as perdas que estão presentes em todos, encontram-se subjugadas por todos os fatores atmosféricos presentes ao mesmo tempo.

Analisando todas as figuras, retira-se que as perdas aumentam desde o início do dia, tendo o seu ponto máximo entre as 13 e as 15 horas. Exceção feita ao dia 11 de Abril, na qual a presença de precipitação levou a um pico de perdas às 17 horas, demonstrando que a chuva tem um grande contributo nas perdas registadas.

Estudando os gráficos nas situações onde não existe precipitação, pode-se analogamente retirar que as perdas aumentam com a humidade relativa e com a velocidade do vento. Como a humidade relativa é o fator dominante, a atenuação provocada pela temperatura é mitigada. Na figura 4.40 pode denotar-se que o aumento da humidade relativa e do vento levaram a um aumento das perdas, mas quando estes fatores começaram a decair, o aumento da temperatura compensou, levando a uma estabilização entre as 14 e 15 horas. Na figura 4.41 é visível a estabilidade das perdas, devido ao aumento da temperatura ser compensado pelo decréscimo da humidade relativa.

Na figura 4.42, a presença de precipitação aplica perdas que se evidenciam nos gráficos, independentemente da temperatura, humidade relativa ou até da velocidade do vento.

Nos dias estudados as perdas máximas obtidas de 32 dB e a variação máxima obtida 5.5 dB.

Importante referir que a pressão atmosférica tem um contributo importante para as perdas, mas no intervalo de tempo estudado em casa dia a sua alteração é residual, sendo necessário estudar um dia completo para verificar a influência deste fator.

DP-QPSK sobre FSO

Para esta parte do trabalho foi utilizado um sinal DP-QPSK com um comprimento de onda de 1550 nm, 4 dBm à saída do emissor, e três *bitrates* diferentes (10, 40 e 100 Gbps). No recetor, é utilizado uma DSP (Anexo B) melhorando os resultados obtidos. Para testar a compatibilidade deste sinal com o sistema FSO, e estudar o comportamento com a introdução de fibra, foram criados os seguintes *setups*:

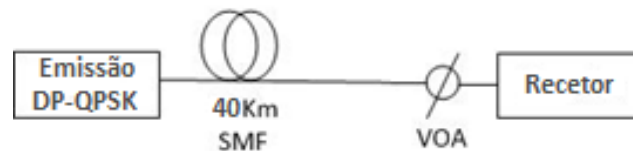


Figura 4.43 : DP-QPSK setup 1



Figura 4.44 : DP-QPSK setup 2



Figura 4.45 : DP-QPSK setup 3

A ligação FSO utilizada consiste no “FSO setup 3” (figura 4.36), devido á utilização do PBS não ser possível para este sinal. Como o PBS é dependente da polarização, o que aconteceria seria o envio de cada polarização para locais opostos.

Primeiro foi realizado o estudo do sistema *back-to-back*, sendo de seguida utilizados os três *setups* das figuras anteriores.

Para um *bitrate* de 10 Gbps foram obtidos os seguintes resultados:

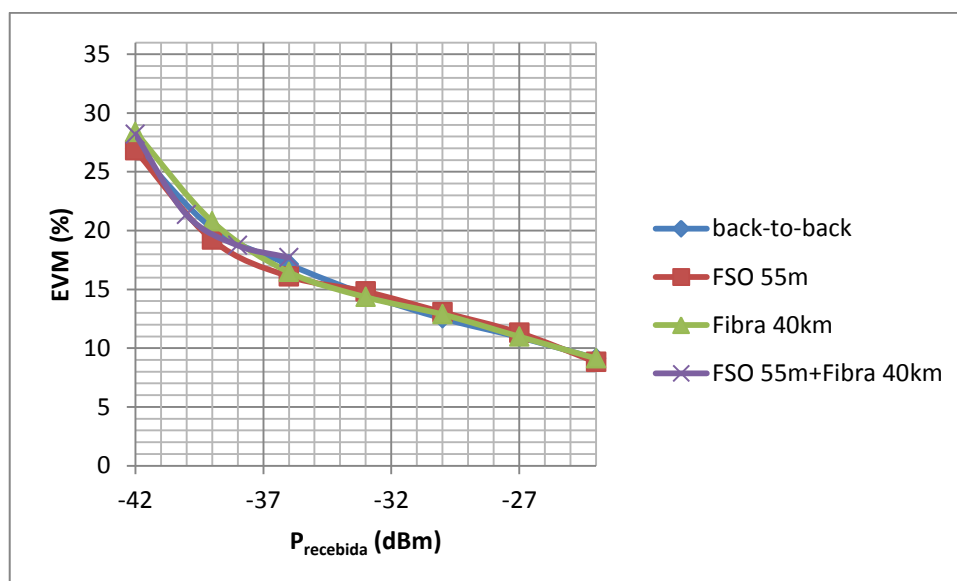


Figura 4.46 : EVM vs Potência recebida para 10 Gbps

Para 10 Gbps, o acrescentar da ligação FSO e da fibra, pouco ou nada alteram a qualidade do sinal em relação ao *back-to-back*, obtendo EVMs similares para as mesmas potências. Apesar da introdução de elementos limitantes no sistema, a aplicação da DSP para este *bit-rate* reduz essas dificuldades, melhorando a performance do DP-QPSK.

Para verificar se o mesmo resultado verificava-se para *bitrates* superiores, utilizaram-se 40 Gbps e obtiveram-se os seguintes resultados:

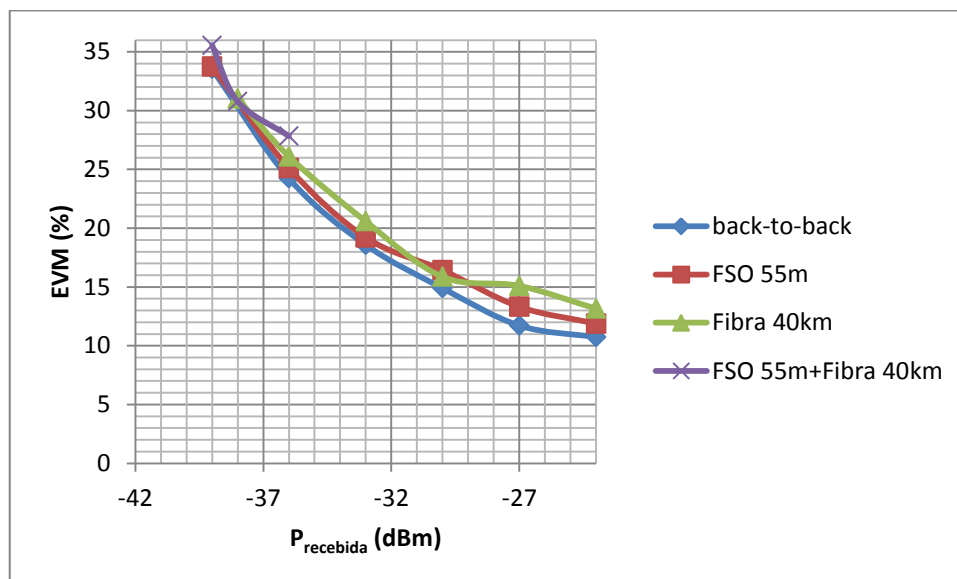


Figura 4.47 : EVM vs Potência recebida para 40 Gbps

Nos 40 Gbps é evidente uma pequena deterioração do EVM para potências de receção maiores, mas apesar desta evidência, os diferentes *setups* têm EVMs muito próximos do sistema *back-to-back*, podendo assim serem considerados um bom resultado.

Para um *bitrate* de 100 Gbps conseguiram-se os resultados seguintes:

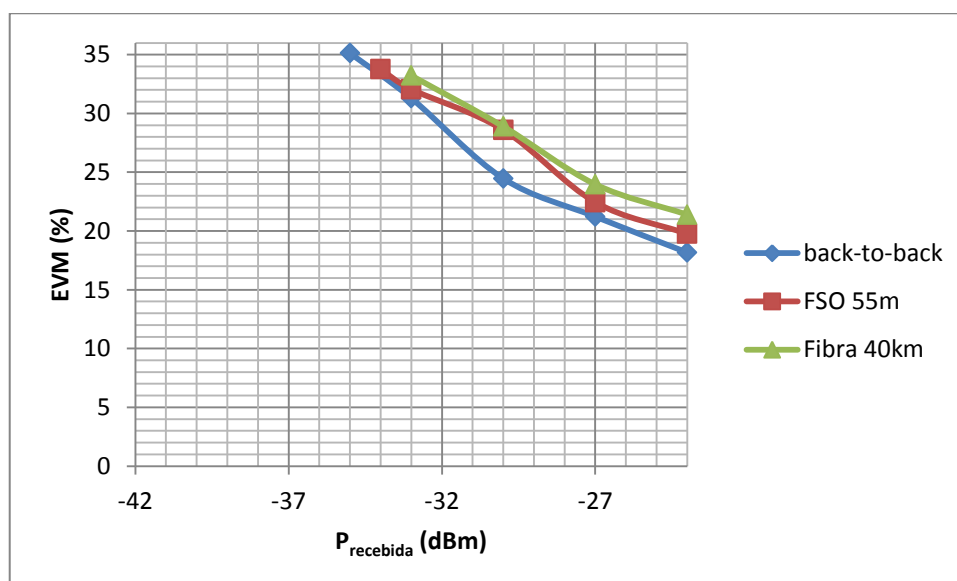


Figura 4.48 : EVM vs Potência recebida para 100 Gbps

A deterioração do EVM de 100 Gbps é maior comparando com os 20 e 40 Gbps. Para obter o mesmo resultado de EVM que o *back-to-back*, na ligação FSO e a fibra de 40 km o recetor deve obter um potência de aproximadamente 1 a 2 dBm acima.

Para um EVM de 32.5% tem-se um BER de 1×10^{-3} . Comparando estes resultados com os obtidos por simulação (figuras 4.19, 4.20 e 4.21), obteve-se a seguinte tabela:

<i>Bitrate</i>	Sistema	<i>Setup</i>	Sensibilidade
10 Gbps	Prático	<i>Back-to-back</i>	< -42dBm
		FSO 55 m	< -42dBm
		Fibra 40 km	< -42dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	< -42dBm
	Simulação	<i>Back-to-back</i>	< -42dBm
		FSO 55 m	< -42dBm
		Fibra 40 km	< -42dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	< -42dBm
40 Gbps	Prático	<i>Back-to-back</i>	-38.5 dBm
		FSO 55 m	-38.5 dBm
		Fibra 40 km	-38.5 dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	-38.5 dBm
	Simulação	<i>Back-to-back</i>	-41 dBm
		FSO 55 m	-40.5 dBm
		Fibra 40 km	-39.8 dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	-39.5 dBm
100 Gbps	Prático	<i>Back-to-back</i>	-31.5 dBm
		FSO 55 m	-31 dBm
		Fibra 40 km	-30.5 dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	-
	Simulação	<i>Back-to-back</i>	-38 dBm
		FSO 55 m	-35.5 dBm
		Fibra 40 km	-34.5 dBm
		FSO 55 m + Fibra 40 km	-

Tabela 4.8 : Comparação entre resultados práticos e de simulação do DP-QPSK

Os resultados de sensibilidade do sistema realizado experimentalmente, estão próximos dos da simulação, exceto nos 100 Gbps, no qual o sistema *back-to-back* introduz uma sensibilidade superior ao esperado. Devido ao recetor prático tolerar apenas 20 GHz, a necessidade de 25 GHz leva à obtenção de piores resultados.

Como era de esperar, o aumento do *bitrate* leva a um aumento da potência necessária no recetor para obter o mesmo desempenho. A introdução de uma DSP leva a que os resultados pouco, ou nada sejam diferentes do *back-to-back*.

Um dos grandes fatores limitantes que é primordial neste sistema, são as perdas aplicadas ao sistema. Nos 100 Gbps, a utilização da ligação FSO em conjunto com a fibra não foi possível devido às perdas aplicadas ao sistema não o permitirem.

TWDM sobre FSO

Nesta secção foi criado TWDM de 40 Gbps utilizado quatro sinais NRZ de 6 dBm cada e utilizando comprimentos de onda diferentes (1555.75 nm, 1556.55 nm, 1557.3 nm e 1558.17 nm), ou seja, 100GHz de espaçamento entre canais como demonstra a figura seguinte:

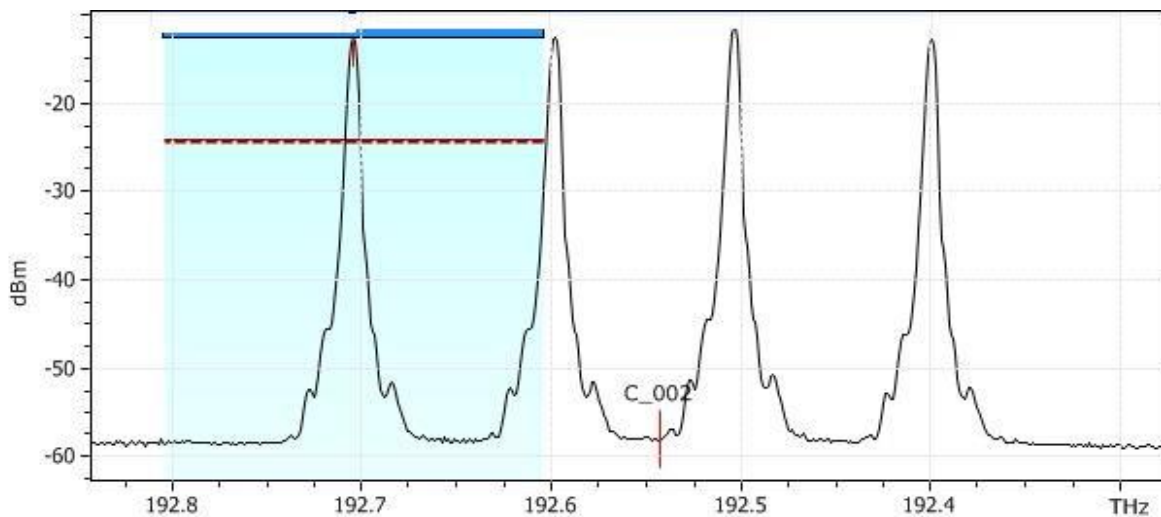


Figura 4.49 : Espectro do sinal TWDM

O TWDM apresenta um *bitrate* de 40 Gbps (cada sinal NRZ tem 10Gbps).

Na receção foi utilizado um circuito comercial (Anexo A) que melhora a qualidade do sinal recebido.

Foi realizada uma primeira análise ao sistema *back-to-back* seguindo-se os seguintes *setups*:



Figura 4.50 : TWDM setup 1

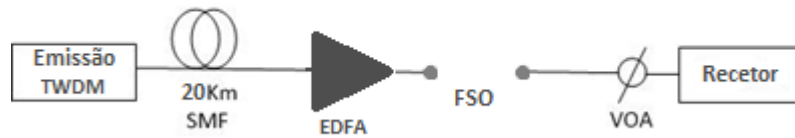


Figura 4.51 : TWDM setup 2

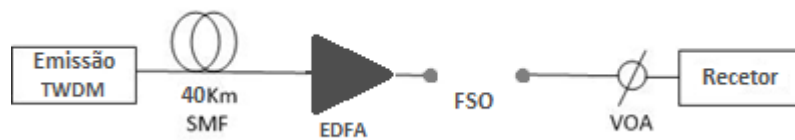


Figura 4.52 : TWDM setup 3

O esquema FSO utilizado foi o FSO *setup* 4 (figura 4.37) e foi necessária a incersão de uma EDFA andes da ligação FSO para compensar as perdas dos elementos utilizados anteriormente. Os resultados obtidos são para os 1555.3 nm, porque teoricamento os outros três comprimentos de onda teriam o mesmo resultado.

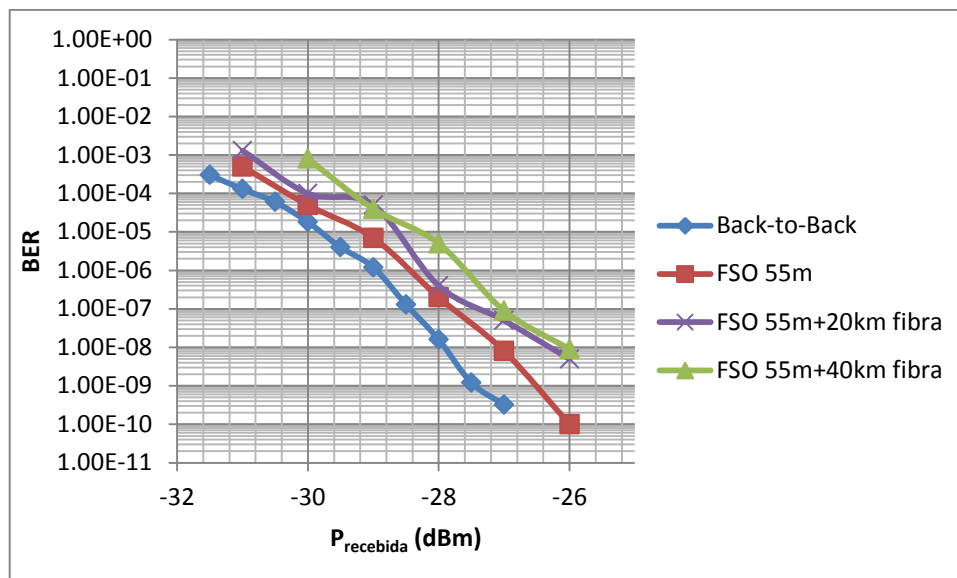


Figura 4.53 : BER vs Potência recebida a 1555.3 nm *downstream*

Comparando os resultados obtidos com os por simulação tem-se a seguinte tabela para um BER de 1×10^{-3} :

Sistema	Setup	Sensibilidade
Prático	<i>Back-to-back</i>	-32.0 dBm
	FSO 55 m	-31.5 dBm
	FSO 55 m+20 km fibra	-31.0 dBm
	FSO 55 m +40 km fibra	-30.0 dBm
Simulação	Back-to-back	-31.0 dBm
	FSO 55 m	-31.0 dBm
	FSO 55 m+20 km fibra	-31.0 dBm
	FSO 55 m +40 km fibra	-31.0 dBm

Tabela 4.9 : Comparação entre resultados práticos e de simulação do TWDM

Os resultados por simulação encontram-se muito próximos dos experimentais.

A proximidade de valores entre os diferentes esquemas pode dever-se à utilização do “Tunable Multiprotocol XFP Optical Transceiver” (Anexo A) que provoca uma melhoria significativa do sinal recebido.

Comparando o TWDM de 40 Gbps (4x 10 Gbps) com o DP-QPSK de 10 Gbps tem-se:

Sistema	Setup	Sensibilidade
TWDM	<i>Back-to-back</i>	-32.0 dBm
	FSO 55 m	-31.5 dBm
	FSO 55 m + fibra 40 km	-30.0 dBm
DP-QPSK	<i>Back-to-back</i>	< -42 dBm
	FSO 55 m	< -42 dBm
	FSO 55 m + fibra 40 km	< -42 dBm

Tabela 4.10 : Comparação de resultados entre TWDM e DP-QPSK

Comparando o TWDM com o DP-QPSK, pode-se retirar para obter o mesmo BER, o TWDM necessita de uma maior potência no recetor do que o DP-QPSK. Isto justifica-se porque além do TWDM usar NRZ 10 Gbps e o DP-QPSK 2.5 Gbaud, os recetores de ambos os sinais são diferentes. A utilização de uma DSP no DP-QPSK permite obter potências de receção menores.

Enquanto no DP-QPSK de 10 Gbps todos os *setups* se encontram sobre o back-to-back, no TWDM, é possível observar uma discrepância entre os resultados.

Também é de salientar que as perdas introduzidas num sistema FSO são muito limitantes. Devido a este facto, deve ser primordial a escolha do equipamento adequado, investindo-se no auto-alinhamento e colimação do feixe.

5 Conclusão e Trabalho Futuro

5.1 Conclusão

Existe uma necessidade crescente de utilização de maior largura de banda nas redes de acesso atuais e as redes PON, brevemente deixarão de poder satisfazer essas necessidades. Por este motivo o uso do NG-PON é uma realidade muito próxima. A tecnologia FSO, como uma tecnologia complementar deve acompanhar essa evolução e o estudo da sua compatibilidade deve ser feito.

Nesta dissertação foi realizado o estudo da aplicação das técnicas mais promissoras do NG-PON (DP-QPSK e TWDM) sobre meio livre e analisada a viabilidade. Como os fatores atmosféricos são um agente limitante numa ligação FSO, inicialmente, foi realizado um estudo do comportamento deste em relação a diferentes fatores como temperatura, vento, humidade relativa e precipitação. O alinhamento, a divergência do feixe e a visibilidade são fatores chave causando atenuação, levando mesmo à perda da conexão.

O estudo das perdas no alinhamento e do *spot size* permitiu perceber que o investimento no equipamento de emissão, recessão e alinhamento são primordiais no FSO. Um pequeno desvio do alinhamento pode causar grandes atenuações e até mesmo a perda da ligação. Em locais de grande atividade sísmica o alinhamento constitui um problema que deve ser resolvido utilizando tecnologias de auto-alinhamento.

Um *spot size* de grandes dimensões pode levar à perda de potência quando o recetor não consegue receber todo o feixe. Para grandes distâncias este problema é mais evidente. Assim, é necessário apostar em colimadores que consigam um ângulo de divergência menor.

Analisando a cintilação, concluiu-se que este problema evidencia-se principalmente para grandes distâncias, ou para fatores de turbulência muito fortes. Observando este efeito nos sinais NRZ e 16-QAM verificou-se que o 16-QAM é o mais afetado. Para pequenas distâncias os problemas que a cintilação introduz são pequenos, mas podem tornar-se significativos quando adicionados a outras dificuldades.

A utilização de DP-QPSK revelou a compatibilidade desta técnica com o sistema FSO. A possibilidade de ter este tipo de sinal com um *bitrate* de 10, 40 e 100 Gbps é real. A possibilidade de uso de fibra em conjunto com a ligação FSO com este formato de modulação também é apresentada e com o uso de uma DSP, os efeitos negativos causados pelos diversos sistemas são atenuados. A utilização de um *bitrate* de 100 Gbps é

o que causa maiores problemas, mas mesmo assim a deterioração do sinal em relação ao sistema *back-to-back* não é problemática.

Uma das tecnologias mais promissoras do NG-PON2 consiste no TWDM e a sua compatibilidade com o FSO foi demonstrada. Sendo o sentido *downstream* o mais problemático, o envio do TWDM não só é possível para uma ligação FSO de 55 m como é possível para 1000 m. A utilização de um recetor que efetua amplificação (anexo A), ajuda a receção do sinal, demonstrando que a introdução de novas tecnologias no lado da receção é uma mais-valia, ajudando o FSO a adaptar-se ao NG-PON.

5.2 Trabalho Futuro

Para trabalho futuro, existe um interesse prático em:

- Aplicar sinais num sistema FSO de comprimento igual ou superiores a 1 km e verificar o desempenho destes;
- Provar a possibilidade de lançar e receber o feixe no mesmo ponto (FSO bidirecional) e suas implicações.
- Testar a utilização de múltiplos emissores e recetores para melhorar o sinal recebido.
- Aplicar um sistema com mais do que uma ligação FSO.
- Criar de um sistema de controlo de potência transmitida, analisando as condições atmosféricas momentâneas.

Anexo A. Tunable Multiprotocol XFP Optical Transceiver

Na parte do TWDM-PON para obter melhores resultados foi utilizado a seguinte placa para a receção do laser:

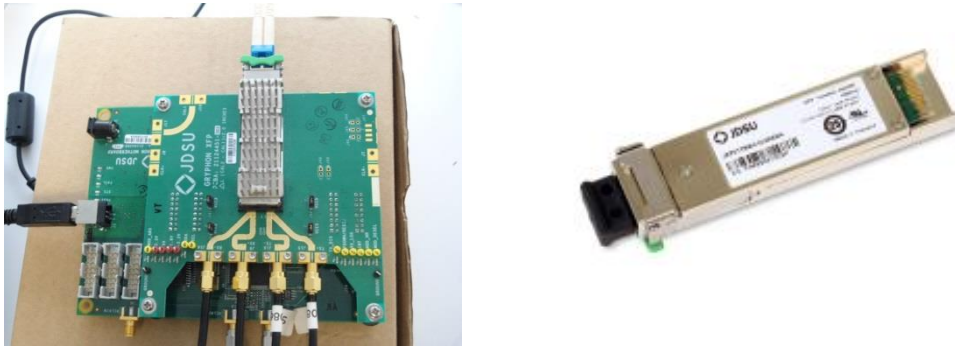


Figura A.1 : Transcetor [25]

O recetor converte o sinal de dados óticos *DC-balanced* série NRZ de linha na gama de 9.95 Gbps até 11.35 Gbps para sinal elétrico de dados série XFI. A luz é acoplada a um fotodetetor APD de fibra ótica monomodo através de um conector ótico LC industrial. A corrente elétrica proveniente do fotodetetor APD é convertida para tensão através de um amplificador de transimpedância. O sinal amplificado é passado para um sinal condicionado IC que fornece sinal de relógio e recuperação de dados. A função de receção CDR gera um sinal de relógio á mesma frequência da taxa de bits do sinal de dados de entrada do recetor ótico. O sinal de relógio é faseado através da PLL que faz a amostragem no centro dos dados do diagrama de olho. A função CDR não requer referência de relógio para fixar os dados recebidos. A função CDR contém um circuito que deteta a fixação do PLL nos dados recebidos. Perda de sinal e deteção de sinal de relógio é incluído no circuito do recetor que está refletido do estado do pino Mod_NR. O sinal de dados recuperado é o sinal de saída nos pinos RD+ e RD- como um sinal CML de 340 mV pico a pico a 100 ohms. Este sinal de saída cumpre os requerimentos XFP MSA. [25]

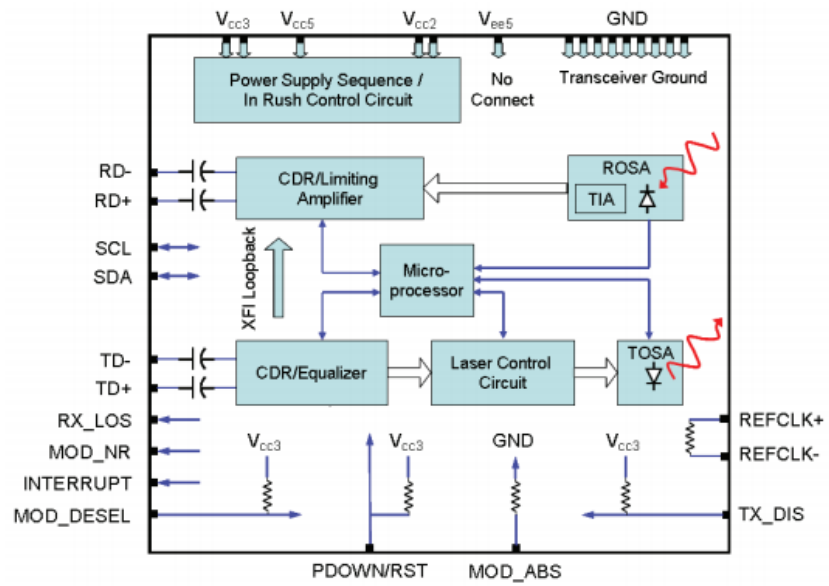


Figura A.2 : Diagrama de blocos funcional [25]

Anexo B. DSP

O DSP (Processamento digital de sinal), tem como principal objetivo melhorar a qualidade do sinal recebido aplicando por isso determinados mecanismos, dos quais as principais etapas se encontram esquematizadas na figura seguinte:

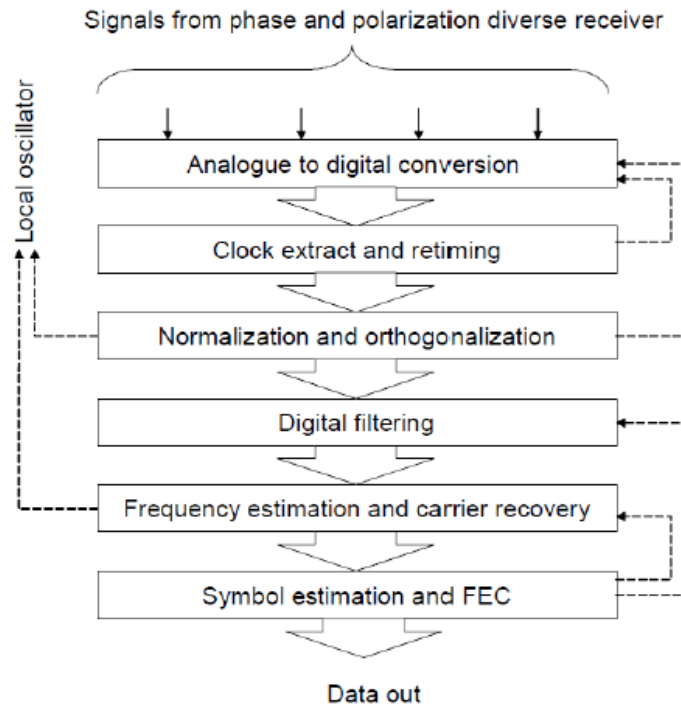


Figura B.1 : Principais etapas utilizadas na DSP num recetor digital coerente [26]

Os dois primeiros blocos são destinados ao condicionamento de sinal, para que, à saída deles, os quatro canais digitais estejam sincronizados com o número inteiro de amostras por símbolo. O bloco de ortogonalização e normalização, é responsável por compensar imperfeições impostas pelo acoplador híbrido 90° e pela variação da responsividade dos oito fotodíodos usados na receção coerente. Segue-se o bloco da filtragem digital que compensa as imperfeições ocorridas durante a transmissão. O penúltimo bloco corrige desvios de fase e frequência entre o sinal recebido e o oscilador local e no final é realizado o FEC. [26]

Bibliografia

- [1] A. Tavares, GPON e vídeo sobre meio livre, Tese Mestrado, Universidade de Aveiro, 2013.
- [2] SaM Solutions, "VPIphotonics," [Online]. Available: <http://www.vpiphotonics.com/>. [Acedido em 2014].
- [3] H. Lopes, Convivência de gerações em redes óticas PON, Tese Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.
- [4] Pt Inovação e Sistemas, "Evolution of FTTH Networks for NG-PON2," 2014. [Online]. Available: <http://www.ptinovacao.pt/content/WP-Evolution-of-FTTH-Networks-for-NG-PON2.pdf>. [Acedido em 2014 Maio 25].
- [5] M. D. Mrakovic e P. S. Matavulj, "Analysis of Coexisting GPON and NG-PON1 Systems," *Telfor*, 2011.
- [6] R. Rubenstein, "Newelectronics," Findlay Media, [Online]. Available: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/technology-developments-are-making-fibre-more-cost-effective/44274/>. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [7] P. M. A. Monteiro, Redes Óticas Avançadas Coerentes NG-PON2, Tese Mestrado, Universidade Aveiro, 2010.
- [8] Wikimedia, "16QAM Gray Coded," 2005. [Online]. Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:16QAM_Gray_Coded.png. [Acedido em 5 Junho 2014].
- [9] Davide M. Forin et al., "Free Space Optical Technologies," *Trends in Telecommunications Technologies*, 2010.
- [10] J. Dios, S. López, A. A. M, F. J. Mendieta e I. N. Hipólito, "Advanced Trends in Wireless Communications," *Trends of the Optical Wireless Communications*, 2011.
- [11] Boundless, "The Ray Aspect of Light," [Online]. Available: <https://www.boundless.com/physics/geometric-optics/light-as-a-ray/the-ray-aspect-of-light/>. [Acedido em 22 Junho 2014].
- [12] R. A. Serway e J. W. Jewett, *Princípios de Física: Óptica e Física Moderna*, vol. 4,

THOMSON.

- [13] Catedu, [Online]. Available:
http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/500/518/html/Unidad_02/imagenes/73.jpg. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [14] e-física, “Estudo analítico - equação dos fabricantes de lentes,” [Online]. Available:
<http://efisica.if.usp.br/optica/basico/lentes/equacao/>. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [15] C. A. Cavalheiro, “Espelhos Côncavos,” InfoEscola, [Online]. Available:
<http://www.infoescola.com/fisica/espelhos-concavos/>. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [16] Puc-rio, “Parâmetros e Balanço de Potência do FSO,” [Online]. Available:
www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124852_05_cap_02.pdf. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [17] H. Willebrand e B. S. Ghumman, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today Network*, Indianapolis USA: Editora Sams.
- [18] M. Campagnolo, “Fundamentos de Detecção Remota,” 10 Maio 2011. [Online]. Available:
http://www.isa.utl.pt/dm/geomat/geomat_2010_2011/aula_fundamentosDR_2.pdf. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [19] Z. Ghassemlooy e W. O. Popoola, “Terrestrial Free-Space Optical Communications,” em *Optical Communications Research*.
- [20] D. Vilela, J. Santos, L. Brandão e M. Breda, “Estudo da Viabilidade de Comunicações Ópticas no Espaço Aberto,” Teleco, 16 Abril 2012. [Online]. Available:
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfsoeab2/default.asp>. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [21] M. G. Sterenborg, J. P. P. Baptista e S. Buhler, “Determining the refractive index structure constant using high-resolution radiosonde data,” Noordwijk.
- [22] A. M. Tavares, “Guia de laboratório FSO,” Universidade Aveiro, 2014.
- [23] VPI Systems, *Scintillation in Free Space Optical Links*, 2005.
- [24] D. A. Hall, “The Basics of ZigBee Testing, Part 1: Transmitters,” 2007. [Online]. Available: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276318. [Acedido em

23 Junho 2014].

[25] JDSU, “Tunable Multiprotocol XFP Optical Transceiver - 1550 nm for up to 80 km reach,” 2012.

[26] R. Ferreira, Processamento Digital de Sinal em Sistemas de Detecção Coerente, Tese Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.